

**José Julio de Cerqueira Pituba
Marcelo H. Stoppa
Vaston Gonçalves da Costa
[orgs.]**

TECNOLOGIAS EM PESQUISA

Engenharias - Volume 2



José Julio de Cerqueira Pituba
Marcelo H. Stoppa
Vaston Gonçalves da Costa
[orgs.]

TECNOLOGIAS EM PESQUISA

Engenharias - Volume 2



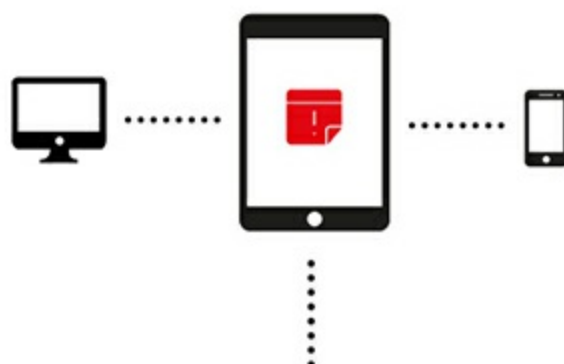
José Julio de Cerqueira Pituba
Marcelo H. Stoppa
Vaston Gonçalves da Costa
(orgs.)

TECNOLOGIAS EM PESQUISA

CIÊNCIAS EXATAS E CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Volume II

PACO  EDITORIAL



IMPORTANTE

Cuidamos para que a produção deste ebook tivesse o mesmo padrão de qualidade das nossas obras impressas. Mas poderá ter variação na apresentação do conteúdo de acordo com cada dispositivo de leitura.

Copyright © 2018 by Paco Editorial

Direitos desta edição reservados à Paco Editorial. Nenhuma parte desta obra pode ser apropriada e estocada em sistema de banco de dados ou processo similar, em qualquer forma ou meio, seja eletrônico, de fotocópia, gravação, etc., sem a permissão da editora e/ou autor.

Revisão:

Capa: Matheus de Alexandro

Diagramação: Bruno Balota

Edição em Versão Impressa: 2018

Edição em Versão Digital: 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Recurso digital Formato: ePub Requisitos do sistema: Multiplataforma ISBN 978-85-462-1409-9

Conselho Editorial

Profa. Dra. Andrea Domingues (UNIVAS/MG) ([Lattes](#))

Prof. Dr. Antonio Cesar Galhardi (FATEC-SP) ([Lattes](#))

Profa. Dra. Benedita Cássia Sant'anna (UNESP/ASSIS/SP) ([Lattes](#))

Prof. Dr. Carlos Bauer (UNINOVE/SP) ([Lattes](#))

Profa. Dra. Cristianne Famer Rocha (UFRGS/RS) ([Lattes](#))

Prof. Dr. José Ricardo Caetano Costa (FURG/RS) ([Lattes](#))

Prof. Dr. Luiz Fernando Gomes (UNISO/SP) ([Lattes](#))

Profa. Dra. Milena Fernandes Oliveira (UNICAMP/SP) (Lattes)
Prof. Dr. Ricardo André Ferreira Martins (UNICENTRO-PR) (Lattes)
Prof. Dr. Romualdo Dias (UNESP/RIO CLARO/SP) (Lattes)
Profa. Dra. Thelma Lessa (UFSCAR/SP) (Lattes)
Prof. Dr. Victor Hugo Veppo Burgardt (UNIPAMPA/RS) (Lattes)
Prof. Dr. Eraldo Leme Batista (UNIOESTE-PR) (Lattes)
Prof. Dr. Antonio Carlos Giuliani (UNIMEP-Piracicaba-SP) (Lattes)

Paco Editorial

Av. Carlos Salles Bloch, 658

Ed. Altos do Anhangabaú, 2º Andar, Salas 11, 12 e 21

Anhangabaú - Jundiaí-SP - 13208-100

Telefones: 55 11 4521.6315

atendimento@editorialpaco.com.br

www.pacoeditorial.com.br

Sumário

FOLHA DE ROSTO

APRESENTAÇÃO

1. APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE VIGA SEÇÃO “TÊ”

João Paulo Favoretto Braz da Cunha

Wanderlei Malaquias Pereira Junior

Guilherme de Oliveira Coelho

Wellington Andrade da Silva

2. APLICAÇÃO DA CURVA ABC NO PROCESSO DE COMPRA DE MATERIAL INDIRETO EM UMA EMPRESA AUTOMOBILÍSTICA

Marina Batistini

Stella Jacyszyn Bachega

3. DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO EFETIVO EM LATAS DE CERVEJA: UMA APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

Débora Carneiro de Deus

Luís Claudio Frazatto Prado

Stella Jacyszyn Bachega

4. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ESFORÇOS DE FLEXÃO EM LAJES NERVURADAS BIDIRECIONAIS

Leonardo Sales Duarte

Wanderlei Malaquias Pereira Junior

Charles Myller Pereira Batista

Antover Panazollo Sarmento

5. ANÁLISE ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE REJEITO CONSIDERANDO A AÇÃO SÍSMICA

Gabriel Gomes Silva

Wellington Andrade da Silva

Antonio Nilson Zamunér Filho

Matheus Henrique Borges Coutinho

6. RASTREAMENTO DE OBJETOS EM VÍDEO USANDO MISTURA DE GAUSSIANAS E FILTRO DE KALMAN: MAPEAMENTO DA LITERATURA

Karla Melissa dos Santos Leandro

Iago Ferreira Lima

Sérgio Francisco da Silva

Marcos Napoleão Rabelo

7. ANÁLISE DE PADRÕES EM GRÁFICOS DE CONTROLE APLICADOS A VIBRAÇÕES

Karla Melissa dos Santos Leandro

Iago Ferreira Lima

Werley Rafael da Silva

Marcos Napoleão Rabelo

8. PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE MINA A CÉU ABERTO COM USO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Brener Gonçalves Vaz

Ana Clara Soares Bicalho

Stella Jacyszyn Bachega

Dalton Matsuo Tavares

9. CLASSIFICAÇÃO DE DANOS EM UMA VIGA A PARTIR DE ASSINATURAS DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

Bruno Pereira Barella

Stanley Washington Ferreira de Rezende

João Paulo Moreira Bento

José dos Reis Vieira de Moura Júnior

10. CLASSIFICAÇÃO DE DANOS EM UMA VIGA DE ALUMÍNIO UTILIZANDO-SE A TÉCNICA DE MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS DE KOHONEN EM ASSINATURAS DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

Stanley Washington Ferreira de Rezende

Bruno Pereira Barella

João Paulo Moreira Bento

José dos Reis Vieira de Moura Junior

11. COMO UMA UNIVERSIDADE PODE SER GREEN EM TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO?

Stella Jacyszyn Bachega
Dalton Matsuo Tavares
Lays Capingote Serafim da Silva
Carulina Marques

12. UMA ABORDAGEM PARA TRATAR PRIORIDADE NO CARREGAMENTO DE ITENS EM CONTÊINERES

Oliviana Xavier do Nascimento
Thiago Alves de Queiroz

13. DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA COMPUTACIONAL PARA DOSAGEM DE CONCRETO

Bruno Henrique Fortuna Silva Franca
Sidney Rosa Junior
Wanderlei Malaquias Pereira Junior
Ricardo Cruvinel Dornelas

14. GERENCIAMENTO DE RECURSOS E MANUTENÇÃO DE MATERIAIS DE UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO PÚBLICO

Janice Rodrigues da Silva
José Waldo Martinez Espinosa
Karine de Jesus Rodrigues Santana
Rodrigo Pereira da Costa

15. INFLUÊNCIA DA CARGA DE COMPRESSÃO UNIAXIAL NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE BRIQUETES DE CALCÁRIO

Victor Hugo Ataíde Borges
André Carlos Silva
Laís Ferreira Tavares
Rita de Cássia Pedrosa Santos

16. COMPARAÇÃO ENTRE O FIO DIAMANTADO E TECNOLOGIAS DE CORTE NÃO DIAMANTADAS

Rita de Cássia Pedrosa Santos
Yuri da Vinci Nobre
Victor Hugo Ataíde Borges
Nathany Santos Guerino

17. EVOLUÇÃO DO FIO DIAMANTADO COMO TECNOLOGIA DE CORTE NA LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Rita de Cássia Pedrosa Santos

Yuri da Vinci Nobre
Victor Hugo Ataíde Borges
Cibele Tunussi

18. ANÁLISE NUMÉRICA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA A PARTIR DE MODELOS EMPÍRICOS

José Carlos Campos Gonçalves Filho
Luciana Vale Silva
Marcos Napoleão Rabelo
Luiz Fernando Elias Martinez
Bruno Rodrigues de Oliveira

19. EFEITOS DA ATUALIZAÇÃO DA NBR 6118 NOS PROJETOS DE PONTES FERROVIÁRIAS – ESTUDO DE CASO

Ana Nívia de Souza Pantoja
João Pedro Sena
Pedro Henrique Pedrosa de Melo
Wellington Andrade da Silva

20. PROJETO DE UM ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÕES SUJEITO A INCERTEZAS NA MASSA E RIGIDEZ

Layane Rodrigues de Souza Queiroz
Romes Antonio Borges

21. ESTUDO DA ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO EM CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO BASE ELÁSTICA

Luan Rodrigues Silva
Pedro Henrique Pedrosa de Melo
João Pedro Sena
Wellington Andrade da Silva

22. OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO PELO MÉTODO GRADIENTE REDUZIDO GENERALIZADO E ALGORÍTIMO GENÉTICO

Heitor Maciel Lima
Nathan Alecrim Laranjeira
Wanderlei Malaquias Pereira Junior
Robson Lopes Pereira

23. USO DO AMIDO DE SORGO COMO DEPRESSOR NA FLOTAÇÃO DE APATITA

Dafne Letícia Florêncio
André Carlos Silva
Elenice Maria Schons Silva
Vitor Hugo Caixeta

24. ESTUDO SOBRE A PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA) NA EDIFICAÇÃO DE ESCRITÓRIOS EM UMA MINERADORA

Hugo Silva Martins
Ricardo Ribeiro Moura
André Alves de Resende
Rafael Rosa Da Silva Guimarães

25. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE IMPRESSÃO E PERCENTUAL DE PREENCHIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS CONFECCIONADAS POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

Stéfany Mayara Ferreira de Rezende
Bruno Alves Maia
Marcelo Henrique Stoppa

26. CRIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE MATRICIAL DE ESTRUTURAS

Jomar Macedo da Silva Filho
João Pedro Sena
Roberto Viegas Dutra
Wanderlei Malaquias Pereira Junior

27. ANÁLISE DE INCERTEZAS DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE CORRENTE ELÉTRICA

Iago Ferreira Lima
Marco Paulo Guimarães
Sarah Cristina Azevedo
André Alves Resende

28. JOGO DE QUEBRA-CABEÇA PARA CRIANÇAS COM DEFICIÊNCIA FÍSICA NOS MEMBROS SUPERIORES UTILIZANDO O DISPOSITIVO VESTÍVEL MYO

Flávia Gonçalves Fernandes
Alexandre Cardoso

Renato de Aquino Lopes

29. ANÁLISE MULTI-ESCALA DE CHAPAS CONSIDERANDO DIFERENTES MICROESTRUTURAS PARA O MATERIAL

Maria Júlia Marques Silva

Jordana Ferreira Vieira

Gabriela Rezende Fernandes

30. ANÁLISE NUMÉRICA DAS REAÇÕES DE APOIO, DE UMA TORRE TRELIÇADA, SUJEITA A CARREGAMENTOS EXTERNOS

Marcos Napoleão Rabelo

Leandro Ramaldes

Karla Leandro Melissa

Werley Rafael da Silva

31. PREPARAÇÃO DO MATERIAL INICIAL DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

Nayara Macedo Vinhal

Gislene da Silva Fonseca

José dos Reis Vieira de Moura Junior

32. MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO FLOW SHOP PERMUTACIONAL COM TEMPOS DE PROCESSAMENTO

Gislene da Silva Fonseca

Nayara Macedo Vinhal

José dos Reis Vieira de Moura Júnior

PÁGINA FINAL

APRESENTAÇÃO

O presente livro reúne vários resultados de pesquisa apresentados e selecionados por pares durante o V Seminário de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação realizado em novembro de 2017 na Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás. Os artigos organizados em forma de capítulos abrigam temas variados dentro da área de Engenharia caracterizando sua multidisciplinaridade e que é uma das vocações marcantes da Regional Catalão. O título do livro reflete as questões presentes nesta característica e apresenta uma sequência do que já vem sendo produzido durante os últimos anos em nossa Regional. De uma maneira geral, os trabalhos abrangem pesquisas que vão desde a simulação de processos visando obter produtividade em sistemas industriais, previsão do comportamento de estruturas e materiais na construção civil, automobilística e de mineração passando, inclusive, por tecnologia assistiva e finalizando com métodos de otimização e suas aplicações em problemas de Engenharia.

Espera-se que o presente livro contribua para pesquisas em áreas correlatas e sirva de referencial teórico a partir dos diversos capítulos apresentados cobrindo temáticas diversas.

É oportuno nesse momento, agradecer o apoio da agência de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) via chamada de financiamento Edital 03/2017 PAEP/CAPES, processo 88881.138785/2017-01 que permitiu a publicação deste livro.

Por fim, esclarecemos que as ideias expressas nos capítulos aqui publicados são de inteira responsabilidade dos autores e autoras, assim como o uso culto da Língua Portuguesa, bem como cumprimento das normas técnicas - ABNT.

José Julio de Cerqueira Pituba

Marcelo Henrique Stoppa
Vaston Gonçalves da Costa

Catalão, 12 de junho de 2018.

Aplicação de métodos de otimização no dimensionamento de viga seção “tê”

*João Paulo Favoretto Braz da Cunha*¹

*Wanderlei Malaquias Pereira Junior*²

*Guilherme de Oliveira Coelho*³

*Wellington Andrade da Silva*⁴

Resumo: O presente trabalho trata da aplicação de métodos de otimização em relação dimensionamento de vigas de concreto armado com seção transversal em formato “Tê”. Para o problema apresentado é elaborada uma função de custo, a qual foi aplicada o método de otimização bioinspirado, Algoritmo de Colônia de Vagalumes (ACV). Na resolução desta função são consideradas as restrições normativas impostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), e estas implementadas junto ao ACV pelo método da penalidade exterior. Tal processo otimização proporcionou a construção de ábacos, para o caso analisado, relativos a altura e área de aço ótimas da viga.

Palavras-chave: Seção “Tê”, ACV, Otimização, Vigas de concreto.

Introdução

O processo de otimização em si, consiste basicamente em um problema de maximização ou minimização de uma função, sendo esta denominada frequentemente de função objetivo (FO). A função objetivo pode ter sua solução restrita em um domínio ou não. Assim o processo de otimização pode ser classificado em dois gêneros básicos de funções: (a) otimização de funções irrestritas; (b) otimização de funções restritas.

Os métodos de otimização podem ser amplamente empregados na solução de problemas reais de engenharia, dessa forma sua aplicação se torna

extremamente interessante.

No tocante de engenharia civil na área estrutural referente a concreto armado, existe certa dificuldade no dimensionamento da armadura longitudinal de vigas considerando os esforços de flexão. Esta dificuldade vem do fato que se faz necessário adotar um valor para altura da viga, antes mesmo de se iniciar o processo de cálculo da armadura longitudinal. Dessa forma, caso a viga não atenda as especificações normativas dadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), faz-se necessário adotar outro valor para a altura da viga e repetir o processo de cálculo. Esta dificuldade é geralmente contornada utilizando relações matemáticas que fornecem um valor aproximado do valor da altura a ser escolhida. Entretanto o valor fornecido por estas relações nem sempre atende às especificações normativas, ou ainda pode ser exagerado podendo acarretar desperdício de material.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014) o cálculo da armadura necessária para resistir a um momento fletor (esforço causado devido à flexão) é um dos pontos mais importantes no detalhamento das peças de concreto armado. Portanto analisar de maneira otimizada o dimensionamento de uma peça de concreto torna-se uma tarefa crucial do ponto de vista econômico, além de que um dimensionamento otimizado tende ao maior aproveitamento dos materiais do ponto de vista da capacidade resistiva.

Tendo em vista esta dificuldade referente ao dimensionamento de vigas, em concreto armado, a flexão, o presente artigo se propõe através do método de otimização bionspirado, Algoritmo de Colônia de Vagalumes (ACV), sendo restrito pelo método da penalidade exterior, a determinar um conjunto de curvas de cargas capazes de relacionar a altura ótima e o vão da viga em análise, de maneira econômica.

1. Desenvolvimento

1.1 Dimensionamento de Peças de Concreto Armado à Flexão

Neste artigo o enfoque é o dimensionamento de vigas de concreto armado com seção “Tê”. Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2014) uma viga de concreto submetida a flexão passa por três estágios ou níveis de deformação, chamados de estádios, e esses estádios que determinam o comportamento da peça até a sua ruptura. Todo esse procedimento faz parte da fundamentação matemática para o dimensionamento de peças de concreto armado.

As hipóteses básicas para o cálculo são descritas no item 17.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014):

- Seções transversais permanecem planas após a deformação;
- Solidariedade entre os materiais;
- As tensões de tração no concreto são desprezadas no dimensionamento;
- Os encurtamentos últimos do concreto e alongamento máximo do aço são dados como 0,35% e 1% respectivamente.
- Admite-se uma adaptação do diagrama parábola retângulo de tensões no concreto para um diagrama retangular de tensões.

1.2 Modelo de Cálculo para Vigas de Concreto em Seção “Tê”

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014) em um piso (laje) de concreto armado apoiado no contorno em vigas, as lajes maciças e as vigas não são independentes umas das outras; pelo fato de as estruturas de concreto serem monolíticas, seus elementos, lajes e vigas, trabalham em conjunto.

Por essas peças trabalharem em conjunto a laje trabalha como se fosse parte da viga, colaborando de forma a ampliar sua resistência, fazendo então com o que a viga incorpore certos trechos da laje e então forme agora uma seção “Tê” e não uma seção retangular.

Essa interação entre laje e viga formando uma seção “Tê” em concreto armado também pode ser observada em lajes nervudas unidirecionais, onde cada nervura assume o formato e se comporta como uma seção “Tê”.

1.3 Dimensionamento para Seções de “Tê” Verdadeiro

Existem duas condições de dimensionamento para seções transversais tipo “Tê”, são elas: (a) Linha neutra passando pela mesa da seção; (b) Linha neutra passando pela alma da seção. Para essa pesquisa adotou-se apenas a segunda situação, pois espera-se que a mesma sempre gere seções transversais mais econômicas. Portanto logo abaixo é apresentado o modelo de dimensionamento que considera a posição da linha neutra sempre passando pela alma, situação comumente denominada em outras bibliografias de “Tê” verdadeiro.

Segundo Bastos (2015) se a condição $0,8.x$ for maior que a altura da mesa h_f , a área da seção comprimida de concreto A_c' não será mais retangular. Desta forma, faz-se a composição da área por retângulos, conforme ilustrado na Figura 1.

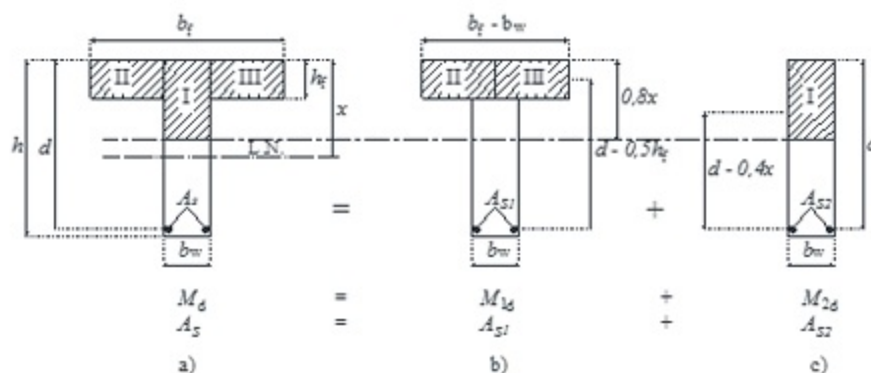


Figura 1. Modelo para cálculo da flexão em seções tipo Tê

Fonte: Bastos, 2015.

Conforme a Figura 3, a seção “Tê” foi dividida em duas seções equivalentes, sendo que o concreto comprimido na mesa (ilustrado na seção b da Figura 3), é equilibrado por uma parcela A_{s1} da armadura longitudinal tracionada, já o concreto comprimido na nervura (ilustrado na seção c da Figura 3), é equilibrado pela parcela A_{s2} da armadura total.

Bastos (2015) afirma que não existe a força normal solicitante externa na flexão simples, de modo que a força resultante do concreto comprimido deve

equilibrar a força resultante da armadura tracionada, conforme equação (1)

$$R_{cc}=R_{st} \quad (1)$$

Onde:

R_{cc} – Força resultante das tensões normais de compressão na área de concreto comprimido;

R_{st} – Força resultante das tensões normais de tração na armadura longitudinal A_s .

Bastos (2015) afirma que as forças internas resistentes formam um binário oposto ao momento fletor solicitante, em função do concreto comprimido e da armadura tracionada, logo pode-se propor a equação para tal situação, conforme equação (2)

$$M_{solic}=M_{resist}=M_d \quad (2)$$

Sendo que o momento fletor de cálculo é dado pela equação (3), apresentada abaixo.

$$M_d=M_{d1}+M_{d2} \quad (3)$$

O momento fletor resistente M_{d1} e M_{d2} são apresentados de forma mais detalhada pelas equações (4) e (5)

$$M_{d1}=(b_f-b_w).h_f.0,85.f_{cd}.(d-0,5.h_f) \quad (4)$$

$$M_{d2}=0,86.b_w.x.f_{cd}.(d-0,4.x) \quad (5)$$

Com o equacionamento acima é possível verificar a posição da linha neutra para o problema de flexão simples equacionado. Segundo o item 14.6.4.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014), para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas e lajes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

- a) $x/d \leq 0,45$, para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa;
- b) $x/d \leq 0,35$, para concretos com $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90$ MPa.

Fazendo a consideração de que o dimensionamento está no domínio 2 ou 3 (onde $\sigma_{sd}=f_{yd}$), e que a há o equilíbrio de momentos próximos do centro de gravidade das áreas comprimidas expressas nas seções b e c da Figura 3, é possível calcular as parcelas de armadura A_{s1} e A_{s2} através das equações (7) e (9):

$$M_{d1}=\sigma_{sd}.A_{s1}.(d-0,5.h_f) \quad (6)$$

Logo:

$$A_{s1}=M_{d1}/(f_{yd}.(d-0,5.h_f) \quad (7)$$

Portanto M_{d2} pode ser dado conforme a equação (8)

$$M_{d2}=\sigma_{sd}.A_{s2}.(d-0,4.x) \quad (8)$$

Logo:

$$A_{s2}=M_{d2}/(f_{yd}.(d-0,4.x) \quad (9)$$

Desta forma, a área total da seção é dada como:

$$A_s=A_{s1}+A_{s2} \quad (10)$$

1.4 Método Bioinspirado: Algoritmo Colônia de Vagalumes

Proposto por Xin-She Yang, o método de otimização Algoritmo de Colônia de Vagalumes (ACV) é um método classificado como bioinspirado, pois observa o comportamento de vagalumes na natureza e a partir dessas observações propõe uma lógica matemática de otimização. Existem diversos modelos de métodos bioinspirados, dentre eles, pode-se citar:

- a) Colônia de abelhas;
- b) Colônia de formigas;
- c) Colônia de bactérias;
- d) Enxame de pássaros;
- e) Enxame de peixes.

Conforme Lobato (2016) o desenvolvimento conceitual do ACV foi inspirado no fenômeno de bioluminescência de vagalumes e sua influência nas interações entre os indivíduos. De maneira geral o processo de otimização do ACV é baseado no modo como um vagalume emite luz e como os demais percebem essa luz.

Segundo Yang (2010), na construção do ACV algumas simplificações em relação ao fenômeno de bioluminescência dos vagalumes são assumidas no intuito de simplificar o desenvolvimento do algoritmo. Estas simplificações podem ser resumidas como:

- a) presume-se que todos os vaga-lumes têm um único sexo, e independentemente de possuir um único sexo são atraídos entre si;
- b) a capacidade de atração de cada vagalume é proporcional ao seu brilho, e esta diminui de acordo com o aumento da distância entre os indivíduos da população;
- c) no caso de não existência de nenhum vagalume mais brilhante que outros, os vaga-lumes irão de mover aleatoriamente.

Basicamente o ACV é baseado nos quesitos de intensidade do brilho, atratividade e distância entre os vagalumes. Segundo Cirino (2013) a intensidade de emissão de luz por parte de um vagalume é proporcional à função objetivo, porém a intensidade de luz percebida por um vagalume decai em função da distância entre os vagalumes. Logo, a intensidade percebida por um vagalume é dada por:

$$J(r)=J_0.e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (11)$$

Onde:

J_0 – Intensidade da luz emitida;

r – Distância euclidiana entre os vagalumes i e j ;

i – Representa o vagalume mais brilhante e j - o vagalume menos luminoso;

γ – Parâmetro de absorção da luz

Desta forma a referência Cirino (2013) formula a atratividade como:

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (12)$$

Onde:

β_0 é a atratividade para uma distância $r=0$.

Assim a movimentação entre vagalumes (vagalume i em direção vagalume j com melhor posição em relação à função objetivo) a cada passo de tempo é dada pela equação (13).

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \beta(x_j^{t-1} - x_i^{t-1}) + \alpha(\text{rand} - 0,5) \quad (13)$$

A utilização ACV requer a entrada de cinco parâmetros que podem influenciar o desempenho na busca pelo ótimo da função objetivo. Estes parâmetros são:

- Número de variáveis de projeto;
- Número da população de vagalumes;
- Número de gerações;
- Fator de atratividade (β);
- Fator de aleatoriedade (α).

O ACV pode ser utilizado tanto para problemas irrestritos quanto para problemas restritos. No caso de problemas restritos, pode-se adicionar as restrições à função objetivo através do método da penalidade exterior, criando uma função pseudo-objetivo à qual será otimizada pelo ACV.

Segundo Lobato (2016) o método pode ser finalizado por diferentes critérios, entretanto o procedimento mais utilizado é a determinação do número máximo de gerações.

1.5 Método da Penalidade Exterior (MPE)

A função de penalidade para o método de MPE é dado pela equação (14).

$$(14)$$

$$P(x) = \sum_{j=1}^m \left\{ \max \left[0, g_j(x) \right] \right\}^2 + \sum_{k=1}^n \left[h_k(x) \right]^2$$

Onde:

g_j – Restrições de desigualdade;

h_k – restrições de igualdade.

Interpretando a função de penalidade, é possível verificar que o método penaliza a função objetivo sempre que algum ponto candidato a ótimo viola a restrição, pois quando este está dentro de uma região factível, tem-se que $P(x)=0$. Portanto a função pseudo-objetivo é equivalente a função objetivo.

Vasconcelos (20--) descreve que as restrições são elevadas ao quadrado para assegurar que a tangente à função de penalidade seja nula sobre a fronteira da região viável. Com isto, pode –se assegurar a continuidade da derivada da função pseudo-objetivo.

De acordo com Saramago (2008) o valor de r_p deve ser atualizado de maneira a sair de um valor pequeno até valor alto. A equação (15) mostra como o valor de r_p é atualizado a cada iteração.

$$r_{p+1} = \gamma \cdot r_p \quad (15)$$

Minimiza-se novamente a função pseudo-objetivo, com base na solução anterior, até sua completa convergência.

2. Metodologia / procedimentos utilizados

O intuito deste artigo consiste em simular numericamente o dimensionamento de modelos de viga baseados em uma função de custo (função objetivo), de forma a obter os valores mais econômicos para altura e a linha neutra da viga, aplicados a diferentes condições de carregamento e de vão livre. Para este problema, utilizou-se o dimensionamento a flexão simples de peças de concreto citado a referência de norma (NBR 6118:2014).

A função objetivo e suas restrições são descritas nas equações (16) a (26), conforme mostrado abaixo.

Função Objetivo:

$$C_{total}=CF+CC+CA \quad (16)$$

Onde:

Custo da forma (CF) é dado por:

$$CF = (bw.L)/1000.67,00 \quad (17)$$

Custo de concreto (CC):

$$CC = (A_{sec}.L)/1000000.320,00 \quad (18)$$

Área da seção de concreto (A_{sec}):

$$A_{sec} = bf.hf + (x1 - hf).bw \quad (19)$$

Custo do aço (CA):

$$CA = (As.LAs)/1000000.4,62 \quad (20)$$

Comprimento da armadura longitudinal (LAs):

$$LAs = L + L/2 \quad (21)$$

Comprimento da aba (bf):

$$bf = bw + 2.(0,10.L) \quad (22)$$

Restrições:

$$g1 = 2,32.(5.P.L^4)/(384.E.I) - L/250 \quad (23)$$

$$g2 = x2 - 0,45 \quad (24)$$

$$g3 = 0,29 - x2 \quad (25)$$

$$g4 = hf - 0,81.x2.(x1 - 3) \quad (26)$$

A equação (23) limita a flecha para o problema, enquanto (24) e (25) limitam o domínio de deformações da peça de concreto, para que ela sempre esteja em regiões do domínio 3 e a equação (26) estabelece que a linha neutra

esteja sempre passando pela alma da seção, para que a mesma tenha comportamento de seção “Tê” verdadeiro. As variáveis de projeto $x1$ e $x2$ equivalem a altura (h) e relação adimensional para a linha neutra (KX) respectivamente.

O processo de otimização utilizado nesse trabalho combina dois tipos diferentes de metodologia. Para obtenção dos valores ótimos da variável de projeto foi utilizado Algoritmo de Colônia de Vagalumes (ACV), já para o processo de montagem da função restrita ou também chamada de pseudo-objetivo, utilizou-se o método da penalidade exterior (MPE).

Assim o processo de otimização consistiu em avaliar a função pseudo-objetivo, para os diferentes casos de carregamento e de vão, através do ACV em busca dos valores ótimos para as variáveis de projeto, no caso, os valores mais econômicos, a fim de compor ábacos que possam ser utilizados no pré-dimensionamento de vigas “Tê” que atendam a restrição normativa quanto à flecha da viga.

Toda a rotina apresentada nesse artigo foi adaptada baseada nos códigos de Yang (2010) com adaptação do professor Fran Sérgio Lobato.

A fim de determinar os parâmetros a serem utilizados no ACV foi feita uma análise de sensibilidade para um dos casos que compõem o ábaco. Essa análise é apresentada na Figura 2.



Figura 2. Análise de sensibilidade ACV

Fonte: Próprio autor.

Feita análise de sensibilidade, decidiu-se por utilizar os seguintes parâmetros para o ACV apresentados na tabela 1:

Nº Avaliações ACV	Semente	Nº Gerações	Tamanho População	Parâmetros de Aleatoriedade	Atratividade	rp
100	0	300	50	0.5	0.9	1.00E+10

Tabela 1. Parâmetros utilizados em Algoritmo Colônia Vagalumes

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 1 ainda traz o valor de “rp” utilizado no método da penalidade exterior, a semente fixada para geração de números aleatórios e o número de avaliações do ACV realizadas, a fim de garantir a determinação dos valores ótimos das variáveis de projeto. Os casos analisados consistiram em determinar o valor ótimo das variáveis de projeto para vãos (L), de acordo com a Figura 3 b), de 4 a 10 metros com quatro carregamentos diferentes, 2, 5, 10 e 15 kN/m. Em relação aos casos descritos anteriormente, a seção padrão possui valores de b_w igual a 12 cm, h_f igual a 5 cm e b_f igual a 25 cm, conforme a configuração da Figura 3 a). Foram adotados valores de 25 MPa para f_{ck} do concreto, sendo este feito tendo como agregado graúdo o granito, 500 MPa para f_{yk} do aço. Os preços dos materiais que compõem a viga foram considerados de R\$ 4,62/kg de aço, R\$ 67,00/m² de forma e R\$ 320,00/m³ do concreto.

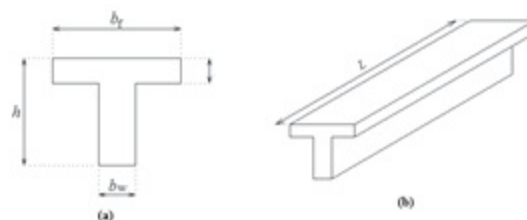


Figura 3. Seção transversal da viga do problema de otimização: (a) seção transversal

Fonte: Próprio autor.

3. Discussão e Resultados

Feito o processo de otimização do problema conforme descrito no tópico “Metodologia”. Obtiveram-se os seguintes resultados apresentados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

L (cm)	h (cm)	kx	As (cm ²)	Cf (R\$)	Ca (R\$)	Cc (R\$)	Ct (R\$)
400	19.35810	0.45000	0.61068	32.16	13.29	38.05	83.50
450	21.84150	0.45000	0.62271	36.18	15.24	47.10	98.53
500	24.34770	0.45000	0.64715	40.20	17.60	57.15	114.95
550	26.87370	0.45000	0.68018	44.22	20.35	68.20	132.77
600	29.41710	0.45000	0.71936	48.24	23.48	80.26	151.98
650	31.97550	0.45000	0.76312	52.26	26.98	93.33	172.57
700	34.54700	0.45000	0.81035	56.28	30.86	107.42	194.56
750	37.12990	0.45000	0.86028	60.30	35.10	122.53	217.93
800	39.72280	0.45000	0.91235	64.32	39.71	138.67	242.69
850	42.32450	0.45000	0.96615	68.34	44.68	155.83	268.84
900	44.93380	0.45000	1.02140	72.36	50.01	174.01	296.38
950	47.54990	0.45000	1.07770	76.38	55.70	193.22	325.30
1000	50.17210	0.45000	1.13510	80.40	61.75	213.46	355.61

Tabela 2. Resultados gerais para carregamento de 2kN/m

Fonte: Próprio autor.

L (cm)	h (cm)	kx	As (cm ²)	Cf (R\$)	Ca (R\$)	Cc (R\$)	
400	26.51300	0.45000	0.98902	32.16	21.52	49.04	102.73
450	29.96560	0.45000	1.07490	36.18	26.31	61.14	123.63

500	33.44520	0.45000	1.16860	40.20	31.79	74.61	146.60
550	36.94690	0.45000	1.26780	44.22	37.93	89.47	171.63
600	40.46740	0.45000	1.37090	48.24	44.75	105.72	198.70
650	44.00330	0.45000	1.47700	52.26	52.23	123.35	227.84
700	47.55230	0.45000	1.58520	56.28	60.37	142.38	259.03
750	51.11250	0.45000	1.69520	60.30	69.17	162.80	292.27
800	54.68230	0.45000	1.80660	64.32	78.62	184.62	327.57
850	58.26010	0.45000	1.91910	68.34	88.74	207.84	364.92
900	61.84510	0.45000	2.03250	72.36	99.51	232.46	404.33
950	65.43630	0.45000	2.14670	76.38	110.94	258.47	445.79
1000	69.03290	0.45000	2.26150	80.40	123.02	285.89	489.31

Tabela 3. Resultados gerais para carregamento de 5kN/m

Fonte: Próprio autor.

L (cm)	h (cm)	kx	As (cm²)	Cf (R\$)	Ca (R\$)	Cc (R\$)	Ct (R\$)
400	33.72230	0.45000	1.55300	32.16	33.79	60.12	126.07
450	38.13950	0.45000	1.71920	36.18	42.09	75.27	153.53
500	42.58440	0.45000	1.89100	40.20	51.43	92.16	183.80
550	47.05170	0.45000	2.06650	44.22	61.83	110.81	216.86
600	51.53710	0.45000	2.24490	48.24	73.27	131.22	252.74
650	56.03730	0.29000	2.41400	52.26	85.36	153.39	291.01
700	60.54990	0.29000	2.58280	56.28	98.36	177.32	331.95
750	65.07270	0.29000	2.75280	60.30	112.32	203.01	375.62
800	69.60430	0.29000	2.92370	64.32	127.24	230.46	422.02
850	74.14330	0.29000	3.09530	68.34	143.13	259.68	471.15
900	78.68870	0.29000	3.26750	72.36	159.98	290.67	523.01
950	83.23980	0.29000	3.44020	76.38	177.79	323.42	577.59
1000	87.79560	0.29000	3.61330	80.40	196.57	357.94	634.90

Tabela 4. Resultados gerais para carregamento de 10kN/m

Fonte: Próprio autor.

L (cm)	h (cm)	kx	As (cm ²)	Cf (R\$)	Ca (R\$)	Cc (R\$)	Ct (R\$)
400	38.91790	0.45000	2.03720	32.16	44.33	68.10	144.59
450	43.93330	0.29000	2.27240	36.18	55.63	85.28	177.09
500	49.05520	0.29000	2.48970	40.20	67.72	104.59	212.51
550	54.19890	0.29000	2.70990	44.22	81.08	125.91	251.21
600	59.36000	0.29000	2.93220	48.24	95.71	149.25	293.19
650	64.53520	0.29000	3.15600	52.26	111.60	174.60	338.46
700	69.72220	0.29000	3.38100	56.28	128.75	201.97	387.00
750	74.91880	0.29000	3.60700	60.30	147.17	231.37	438.83
800	80.12370	0.29000	3.83370	64.32	166.84	262.78	493.94
850	85.33550	0.29000	4.06100	68.34	187.78	296.22	552.34
900	90.55320	0.29000	4.28880	72.36	209.98	331.67	614.01
950	95.77600	0.29000	4.51700	76.38	233.44	369.15	678.97
1000	101.00340	0.29000	4.74550	80.40	258.16	408.65	747.21

Tabela 5. Resultados gerais para carregamento de 15kN/m

Fonte: Próprio autor.

De maneira geral percebe-se que dentre os materiais que compõe a viga, o concreto foi o que apresentou maior custo, representando de 45 a 60 % do custo total. Visto que o aço é um material mais caro que concreto, e se tratando de um problema de otimização relacionado à economia, era esperado que na composição da viga (nervura) fosse mais utilizado concreto do que aço, devido ao seu menor custo em relação ao aço. Dessa forma o concreto aparece representando maior porcentagem do custo total.

Os valores de taxa de armadura pela seção de concreto em todos os casos foram 0,17 a 0,38 %, respeitando as exigências normativas da NBR 6118 (ABNT, 2014) para valores mínimos de 0,15% e máximos de 4%.

Com os resultados obtidos elaboraram-se dois ábacos, sendo um em função do vão e da altura ótima da viga (nervura) e ou em função do vão e da

área e aço ótima. Os ábacos são apresentados nas Figuras 4 e 5.

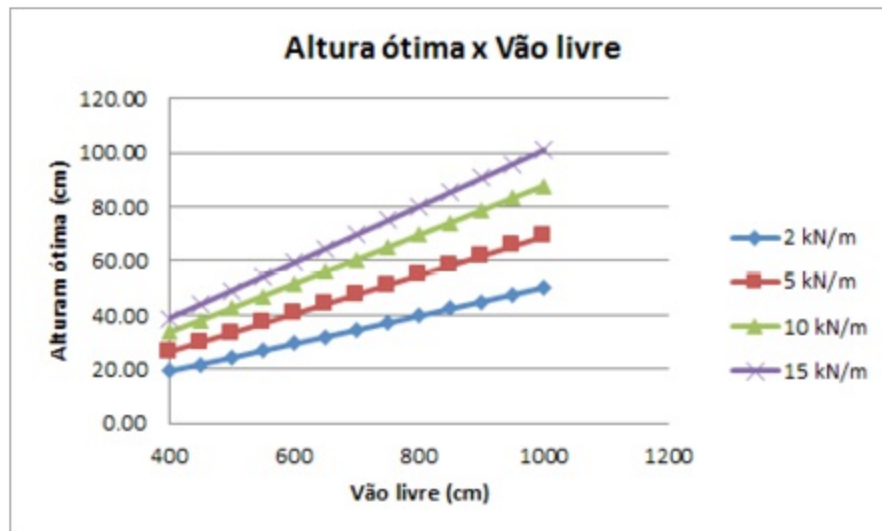


Figura 4. Ábaco altura ótima versus vão livre

Fonte: Próprio autor.

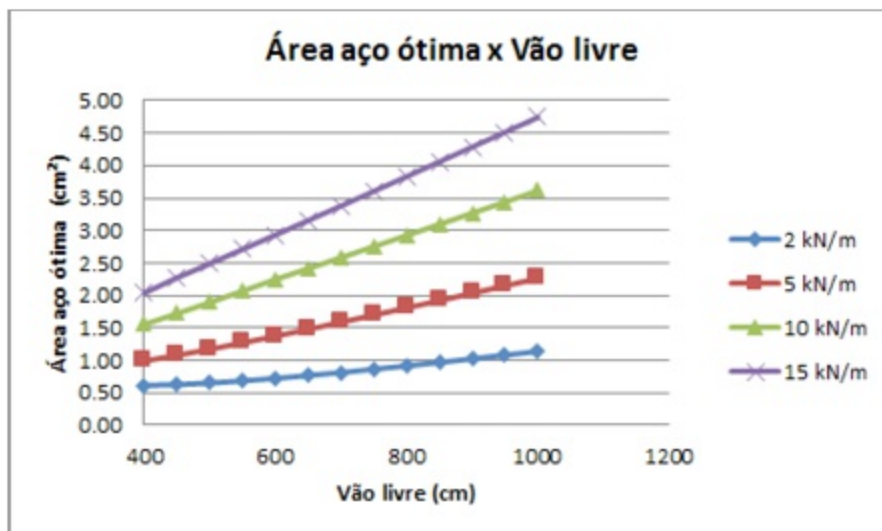


Figura 5. Ábaco área de aço ótima versus vão livre

Fonte: Próprio autor.

Em relação ao custo da viga (nervura) elaborou-se um gráfico que apresenta a evolução do custo conforme o aumento do vão, e este é apresentado na Figura 6.

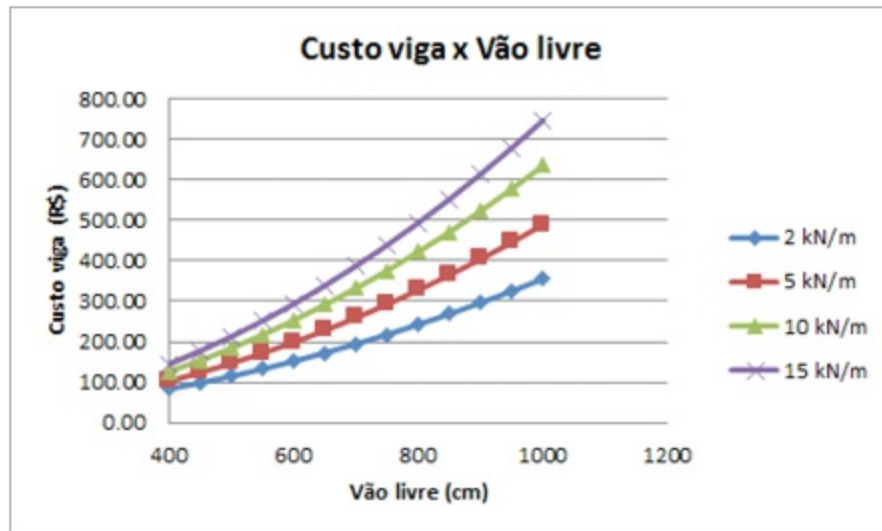


Figura 6. Custo da viga (nervura) por vão *versus* vão livre

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 6 acima podemos perceber um comportamento exponencial do custo à medida que o vão livre aumenta, dessa forma pode-se propor que existem distribuições mais econômicas de vãos que outras. Isto é, o custo de um vão muito grande pode ser reduzido ao dividi-lo em vãos menores.

Considerações finais

Dentro do objetivo inicial desse estudo o mesmo cumpriu o esperado que era de avaliar o custo total de uma peça de concreto utilizando uma técnica de otimização no dimensionamento a flexão de vigas em seção “Tê”.

É visível que o processo de otimização é de fato muito interessante para o problema em questão, visto que o mesmo conseguiu determinar valores ótimos para as variáveis de projeto, de forma a não só gerar economia, mas também a atender os critérios normativos. Além de possibilitar a elaboração de ábacos que possam auxiliar no dimensionamento de vigas “Tê” no caso específico deste artigo.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos S. **Notas de aula de Flexão normal simples - vigas.** Bauru: UNESP, 2015. (Apostila).
- CARVALHO, Roberto C.; FIGUEIREDO FILHO, Jasson R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado:** Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EduFSCar, 2014.
- CIRINO, Rubens L.; et al. **Aplicação do algoritmo de colônia de vagalumes com aprendizado baseado na oposição em um problema inverso de transferência radiativa:** Artigo. Natal: UFRN, 2013.
- LOBATO, F. S. **Guia de Estudos:** Algoritmo de Colônia de Vagalumes. Catalão: UFG/PPGMO, 2016. (Apostila).
- SARAMAGO, Simone P.; STEFFEN JR., Valder. Introdução às Técnicas de Otimização em Engenharia. **Horizonte Científico**, v. 1., n. 9, 2008.
- VASCONCELOS, J. A. Notas de aula de programação não linear. Maringá: UFMG. (Apostila).
- YANG, Xin-She. **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms.** 2. ed. Cambridge: Luniver Press, 2010.

Notas

1. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Programa Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: jpfavoretto@gmail.com.
2. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.
3. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão. Engenheiro Civil. Contato guilherme.de.oliveira.coelho@gmail.com
4. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: wellington.andrade@gmail.com.

Aplicação da curva abc no processo de compra de material indireto em uma empresa automobilística

Marina Batistini⁵

Stella Jacyszyn Bachega⁶

Resumo: Este artigo retrata uma parte da atividade de compras que é menos abordada na literatura, pois existem inúmeros estudos relativos a compras de materiais diretos. A pesquisa tem como objetivo apresentar o processo de compras de materiais indiretos e fazer uma análise do mesmo. Houve aplicação da classificação ABC em uma empresa do setor automotivo e melhorias foram sugeridas. Para tanto, foi empregada a abordagem de pesquisa mista qualitativa e quantitativa e o procedimento estudo de caso. A aplicação da classificação ABC ajudou a identificar os itens que devem receber maior atenção no momento da programação de compra, auxiliando na tomada de decisão de quanto comprar, evitando o excesso de estoque para os mesmos. O modelo de programação de itens indiretos desta organização consegue atender em nível primário a demanda do processo, mas ainda tem carências de quesitos essenciais para que seja realizada de maneira ótima.

Palavras-chave: Curva ABC. Setor Automotivo. Processo de Compras.

Introdução

O setor automotivo é atuante em todas as regiões brasileiras com 64 unidades industriais responsáveis por grande geração de renda e emprego (Anfavea, 2016a). Historicamente, o mercado automotivo brasileiro apresentou um crescimento. De acordo com os dados da Anfavea (2016a), de 1966 a 2014 houve uma ascensão significativa desse mercado. O faturamento

líquido, em 1966, foi de US\$861 milhões. Já em 2014 foi de US\$75.038 bilhões. O maior faturamento foi em 2011, contabilizando US\$ 93.566 bilhões.

Nas últimas décadas que antecedem 2012, a indústria automotiva apresentou crescimento, entretanto, houve alterações, mas manteve-se o histórico de crescimento quanto ao faturamento líquido e impulsionou os números da economia. Todavia, segundo Anfavea (2017a), a crise neste setor teve início em 2012, quando houve o faturamento líquido de US\$83.633 bilhões. Em 2013 houve uma reação do setor, com faturamento de US\$87.294 bilhões, mas nos anos seguintes voltou a apresentar queda. Em 2014 o faturamento líquido foi de US\$75.038 bilhões e em 2015 foi de US\$45.665 bilhões. Em 2015, o total de licenciamentos de veículos novos foi de 2.568.976 unidades, já em 2016 foram 2.050.321 unidades. De janeiro a maio de 2017, o total de licenciamentos de veículos novos foi de 824.491 unidades. Analisando o mesmo período de 2016, verificou-se o total de 811.743 unidades de licenciamentos de veículos novos (Anfavea, 2015, 2016b, 2017b).

Esse setor dispõe de uma série de atividades operacionais e de gestão, que contribuem para o seu funcionamento. Entre essas atividades, encontra-se a gestão da cadeia de suprimentos, que conforme Slack, Johnston e Chambers (2009) é uma rede que envolve as empresas que participam do processo de produção de determinado artigo, da matéria-prima ao cliente. É nesse contexto que o processo de compras se insere.

Compras, segundo Dias (1993), compõe o processo de suprimento, sendo vital para o funcionamento das organizações, pois ela é responsável por atender as demandas de materiais e serviços, planejar quantitativamente para atender no momento oportuno e com as quantidades apropriadas, assegurar que a entrega foi realizada e de acordo com o pedido de compra realizado e, por fim, providenciar o armazenamento. Fleury (2000) afirma que o processo

de compras é um dos processos essenciais para a gestão da cadeia de suprimentos das organizações, que é fundamental para assegurar o funcionamento da mesma.

O processo de compras pode tratar de itens de relação direta ou indireta com o produto final. Os itens indiretos, comumente possuem demanda não atrelada com o planejamento de produção, trazendo complexidade para o processo de previsão de demanda e compra dos mesmos.

Com base nesse contexto, este artigo tem como objetivo apresentar o processo de compras de materiais indiretos e fazer uma análise do mesmo. Para tanto, houve aplicação da classificação ABC e melhorias foram sugeridas com o propósito de contribuir para a organização, buscando assim um processo adequado.

Julga-se o tema importante por sua relevância, sendo que, envolvem atividades que influenciam na empresa como um todo, pois o processo de compras pode interferir nos recursos da empresa, desde o capital até os níveis de estoque. O presente tema da pesquisa é apresentado nos trabalhos de Aragão et al. (2016), Silva, Mateus e Silva (2016), Ronchi et al. (2016), Godeiro et al. (2016) e Swerts et al. (2016).

Para cumprir o objetivo proposto, este trabalho é organizado da seguinte forma: na próxima seção há o referencial teórico; na seção dois há a metodologia da pesquisa; na seção três estão os resultados e discussão, por fim, há as considerações finais.

1. Referencial teórico

1.1 A atividade de compras e seu planejamento

A importância de compras no cenário organizacional atual foi construída juntamente com a evolução dos modelos de administração e a própria demanda do mercado com as implicações evolutivas que foram inseridas. No começo do século XX o sucesso das organizações era medido quase

exclusivamente pela capacidade de vendas dos artigos produzidos. Historicamente, as duas grandes Guerras Mundiais afetaram muitos conceitos anteriormente estabelecidos. Para Leenders e Wierenga (2002), as Guerras Mundiais reduziram consideravelmente a produção industrial, o que provocou um efeito de aumento da importância estratégica da atividade de compras, pois o funcionamento das empresas dependia da tarefa de conseguir insumos para manter a produção funcionando.

Leenders e Wierenga (2002) também ressaltam que a atividade de compras, assumiu um papel estratégico e interligado com as demais atividades da empresa e não é mais vista como independente do restante das funções da organização. A notável terceirização de atividades reflete em desenvolver fornecedores mais aptos para assumi-las, com isso, o departamento de compras deve estar cada vez mais preparado para conduzir bons processos.

Conforme Slack, Johnston e Chambers (2009), suprir a capacidade produtiva para atender à demanda atual e futura é uma responsabilidade fundamental da administração da produção. Existem fundamentos essenciais que contribuem para o alcance dos objetivos operacionais da empresa. Um dos fundamentos é o planejamento. De acordo com Corrêa, Ganesi e Caon (2008), planejar é compreender como a consideração conjunta da situação atual e da visão de futuro influenciam as tomadas de decisões no presente para alcançar objetivos no futuro.

Corrêa, Ganesi e Caon (2008) ainda ressaltam que o processo de planejamento é ininterrupto, pois o planejador deve sempre estar atento às mudanças presentes e sua influência no futuro. Para tal, o autor sugere seguir os seguintes passos: i) levantar a situação presente; ii) desenvolver e reconhecer a “visão” de futuro; iii) tratar em conjunto a situação presente e a “visão” de futuro; iv) tomar a decisão gerencial e; v) executar o plano.

Slack, Johnston e Chambers (2009) também destacam determinados aspectos de desempenho que são influenciados diretamente pelo planejamento, sendo: os custos, as receitas, o capital de giro, a qualidade, a velocidade de resposta à demanda, a confiabilidade do fornecimento e a flexibilidade.

Os sistemas de administração da produção, de acordo com Corrêa, Ganesi e Caon (2008), têm como finalidade apoiar a tomada de decisão dos gestores para responder aos seguintes assuntos:

- Planejar as necessidades, considerando a aptidão produtiva da organização;
- Planejar os materiais adquiridos;
- Planejar de modo apropriado os níveis de estoques de matérias-primas, semiacabados e produtos finais;
- Programar as atividades de produção, com vistas a garantir a utilização dos recursos produtivos abrangidos;
- Conhecer e informar corretamente sobre a circunstância corrente dos recursos (pessoas, equipamentos, instalações, materiais) e das ordens (de compra e de produção);
- Garantir os menores prazos admissíveis aos clientes e cumpri-los;
- Ter a capacidade de responder de modo satisfatório.

Segundo Corrêa, Ganesi e Caon (2008), é indispensável a mensuração do desempenho pelos sistemas de administração da produção, pois informam a valorização em um nicho de mercado. Esses aspectos traduzem qual é a percepção do cliente para definir a sua escolha de compra, a saber: i) custo percebido pelo cliente; ii) velocidade de entrega; iii) confiabilidade de entrega; iv) flexibilidade das saídas; v) qualidade dos produtos; vi) serviços prestados ao cliente.

A classificação de materiais pode auxiliar na obtenção de um bom desempenho do sistema produtivo. Tal assunto é abordado na próxima

subseção, onde há a apresentação da ferramenta de classificação ABC.

1.2 Classificações de materiais

Segundo Moreira (2006), existem dois padrões básicos de consumo de um item. Padrões esses classificados como demanda dependente e demanda independente. O entendimento deste conceito é essencial para que se adote o planejamento adequado para cada item. Demanda dependente é aquela cuja necessidade é gerada a partir da produção de itens finais; já a demanda independente é aquela não correlacionada com a quantidade produzida do item final.

As empresas apresentam soluções de sistemas como o MRP (*Material Requeriment Planning*), MRP II (*Manufacturing Resource Planning*), ERP (*Enterprise Resource Planning*) etc., que planejam a compra de itens com demanda dependente. Contudo, ao se tratar de itens com demanda independente, as soluções são escassas (Moreira, 2006).

Os itens com demanda independente, também denominados de itens indiretos, geralmente não são cadastrados nas estruturas dos produtos, a chamada BOM (*Bill of Material*). A complexidade para se estimar a demanda destes itens é notável, pois os cálculos podem apresentar diferenças entre eles, existindo, assim, diversos padrões de comportamento de demanda para os vastos grupos de itens. Os materiais indiretos têm tanta importância quanto os materiais diretos, pois ambos são indispensáveis para o negócio da organização. Além de seu planejamento ser mais complexo devido à dificuldade de se mensurar a demanda para efetuar os pedidos de compra (Moreira, 2006).

A curva ABC pode ser utilizada como ferramenta de auxílio na classificação de materiais. Segundo Dias (2005), a classificação ABC é uma ferramenta importante para priorização dos itens mais relevantes em

detrimento de itens menos relevantes, por meio da ordenação conforme sua importância relativa.

Nesta ferramenta, os itens são dispostos em listas conforme campos pré-estabelecidos para ordenação. No caso de estoques, costuma-se utilizar valor unitário e volume de compras. A partir do produto dos dois campos, obtêm-se o valor total gasto com a compra de um item em um período. Classificando do maior para o menor, e calculando o percentual acumulado de compras dos itens, pode-se verificar sua relevância financeira para o estoque (Dias, 2005).

Dias (2005) ainda cita os percentuais comumente utilizados na classificação para cada categoria, sendo que os itens de classe A representam 80% de relevância para o total, enquanto os itens de classe B representam 15% de relevância e os itens de classe C representam 5%. Os valores podem ser adequados para cada situação, e os percentuais citados são apenas uma referência para utilizar a ferramenta. O gráfico com os valores sugeridos é observado na Figura 07.

Conforme observado na Figura 07, o crescimento do valor do estoque é muito mais elevado para os itens que são de curva A. Na classe B, existe uma elevação mais discreta e na classe C a elevação é bem mais baixa. Esta evolução evidencia que se priorizados, os itens de classe A são de maior importância, quando comparados com critérios iguais às demais categorias.

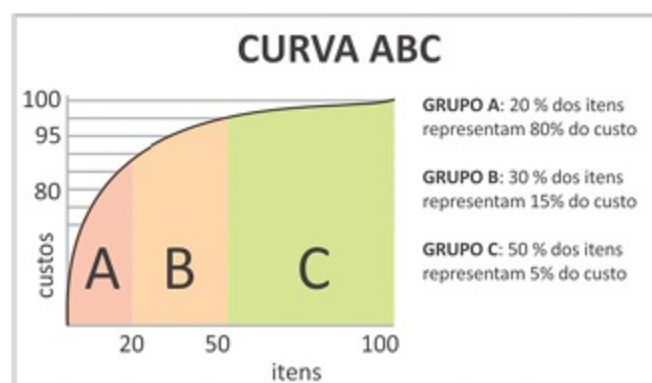


Figura 7. Exemplo de gráfico de Curva ABC

Fonte: Adaptado de Dias (2005).

De acordo com Moreira (2006), a curva ABC é aplicável em qualquer caso de classificação de itens, de quaisquer naturezas e sob qualquer critério. Nesse trabalho, foi aplicada a ferramenta de classificação ABC para identificação dos itens com maior necessidade de controle.

A classificação ABC teve como base o consumo e o custo de aquisição dos itens, sendo realizada por grupo de materiais (ferramentas, equipamento de proteção individual e material de consumo), na intenção de facilitar o cálculo e visualizar os itens mais significativos dentro do seu próprio grupo.

2. Metodologia

A pesquisa realizada tem abordagem mista, qualitativa e quantitativa, o que é levantado em critérios de análises quantificáveis e conceituais no campo de estudo. O procedimento adotado é o estudo de caso, que foi empregado em uma montadora de veículos atuante no mercado brasileiro.

Segundo Martins (2012), a característica marcante da abordagem quantitativa é o ato de mensurar variáveis de pesquisa tendo como foco a estrutura e os elementos da estrutura do objeto estudado, enquanto a abordagem qualitativa enfatiza a perspectiva do indivíduo que está sendo estudado, levando em consideração a realidade subjetiva dos indivíduos envolvidos na pesquisa, com foco nos processos do objeto de estudo. Com a combinação das abordagens é possível um melhor entendimento dos problemas de pesquisa.

Já o estudo de caso, de acordo com Miguel e Souza (2012), tem um caráter empírico que investiga um determinado fenômeno dentro de um contexto real contemporâneo por via de análise aprofundada de um ou mais casos.

O tema desta pesquisa retrata uma parte da atividade de programação de compras que é menos abordada, pois existem inúmeros estudos relativos à

programação de compras de materiais diretos, e o volume é relativamente menor quando o objetivo é a programação de compras de materiais indiretos.

A programação de compra dos itens indiretos na empresa estudada é feita mensalmente em planilhas de Excel® com base na análise do consumo mensal de cada item dos últimos seis meses, levando em consideração o estoque, o lote mínimo de compra, o *lead time*, o prazo de validade de cada item e o *forecast*. Uma das maiores dificuldades para a realização da programação de compra destes itens é a falta do consumo padrão.

A coleta de dados foi realizada no primeiro e segundo semestre de 2016, com acesso ao banco de dados da empresa pesquisada, e das planilhas de programações de fornecedores de materiais indiretos, que o departamento de PCM (Planejamento de Compras de Materiais) utiliza nesta atividade.

3. Discussão e resultados

Durante o primeiro e segundo semestre de 2016, levantou-se por meio dos controles do departamento de Planejamento de Compras de Materiais (PCM) o número total de fornecedores e itens, diretos e indiretos utilizados nas operações produtivas. Estas informações podem ser visualizadas na Tabela 6.

Classificação	Quantidade de fornecedores	Percentual	Quantidade de itens	Percentual
Diretos	204	66,02%	2.442	66,83%
Indiretos	105	33,98%	1.212	33,17%

Tabela 6. Quantidade de fornecedores e itens diretos e indiretos

Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme a Tabela 6, o número de fornecedores ativos indiretos é praticamente a metade dos diretos, sendo 105 fornecedores de materiais indiretos e 204 de materiais diretos. A informação do número de itens

também acompanha esta tendência, sendo 1.212 itens indiretos e 2.442 itens diretos.

Ressalta-se que na empresa onde este estudo de caso foi realizado, os itens com demanda dependente, que não são possíveis as mensurações do consumo exato por unidade produzida, são classificados e controlados como itens indiretos. Fazem parte do grupo de itens que internamente além de indiretos também são chamados de Material Auxiliar de Produção.

A classificação ABC foi aplicada nos itens indiretos especificamente na empresa responsável pela operação de montagem dos veículos. Destaca-se que um fornecedor do item A pode ser o mesmo de um item B e/ou C. Portanto, a somatória da quantidade de fornecedores na Tabela 7 (115) será superior à apresentada na Tabela 6 (105), indicando a repetição de fornecedores em cada classificação. O resultado da classificação ABC é demonstrado na Tabela 7.

Curva	Percentual do faturamento	Quantidade de fornecedores	Quantidade de itens
A	80,78%	26	93
B	15,14%	28	169
C	4,08%	61	666

Tabela 7. Quantidade de fornecedores e itens indiretos

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 7 demonstra que 26 fornecedores e 93 itens representam 80,78% do faturamento dos itens indiretos da organização, portanto, são classificados como curva A. Outros 28 fornecedores com 169 itens representam 15,14% do faturamento, e são classificados como curva B. Já para 61 fornecedores e 666 itens, com 4,09% de representatividade é atribuída à curva C.

Diversas particularidades foram levantadas sobre a programação de compras de itens indiretos, entre elas, a perecibilidade, o consumo com

proporção não exata conforme a demanda de produção etc.

A programação dos itens indiretos é feita com periodicidade de um mês. Desta forma, os dados são levantados e inseridos manualmente nos controles, que trazem o resultado para análise e programação de compras para o próximo mês.

Para exemplificar a compra de materiais indiretos, foi utilizado o exemplo da “Cola”. Os dados referentes a esse item são descritos na Tabela 8 a seguir.

Descrição	Cola
Consumo médio mensal	1.520
Unidade de medida	KG
Valor unitário (R\$)	28,93
Valor total (R\$)	43.973,60
Percentual do total dos indiretos (%)	10,79
Curva	A
Lead time (em dias)	100
Lote mínimo	240

Tabela 8. Dados da Cola

Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme a Tabela 8, a Cola é um item que tem consumo médio mensal de 1520 quilos, sendo que o preço unitário é de R\$28,93, totalizando R\$43.973,60 em compras no mês, representando 10,79% do total de compras com materiais de consumo indireto, classificado como curva A, possuindo um *lead time* de 100 dias e um lote mínimo de compra de 240 quilos.

Levando em consideração estas informações, assumindo um estoque de segurança de 5 dias e entregas semanais, têm-se a seguinte situação:

- Demanda Média Mensal: 1.520 quilos;
- Estoque de segurança: 5 dias / 20 = 0,25 1.520 x 0,25 = 380 quilos;
- Lote mínimo de compra: 240 quilos / semana.

Contextualizando estes dados, têm-se a situação definida, conforme a Figura 8 exibida a seguir. A Figura 8 mostra que a Cola possui entregas semanais variando de 240 a 480 quilos, conforme lote mínimo de compras, mantendo um estoque de segurança de cinco dias, 380 quilos.

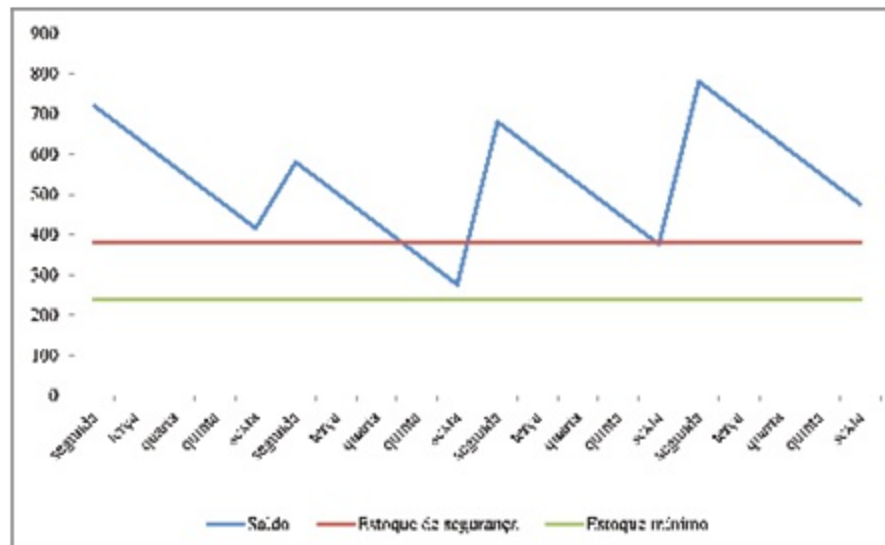


Figura 8. Exemplo de gráfico dente de serra para a Cola

Fonte: Dados da pesquisa.

De posse dessas informações para a programação de cada item, o programador é responsável por analisar todas as variáveis (estoque, utilização, demanda, tamanho do lote de compra, lead time, curva etc.) e fazer o planejamento de compras para cada item. Para se chegar até essas informações, são geradas pelo programador, mensalmente (no primeiro dia útil do mês), planilhas eletrônicas por meio do sistema de informação, para o levantamento: do saldo pendente de entrega dos pedidos programados, do saldo do estoque sistêmico atual, do consumo mensal dos últimos seis meses e da programação da produção do mês atual e dos próximos meses.

Esses dados são inseridos manualmente em uma planilha eletrônica que contém todos os dados necessários para a realização das análises para novas programações de compra e todas as condições comerciais (fornecedor, item,

valor unitário, lead time, condição do frete e lote mínimo de compra) contratadas previamente pelo departamento de suprimentos da empresa. Conforme exemplificado na Tabela 9.

Código do fornecedor	000000
Fornecedor	X
Código do item	Y
Descrição	Cola
Unidade de medida	Kg
Valor unitário (R\$)	28,93
Lead time (em dias)	100
Consumo de dezembro	1.440
Consumo de janeiro	1.200
Consumo de fevereiro	1.440
Consumo de março	1.680
Consumo de abril	1.440
Consumo de maio	1.920
Estoque sistêmico em 01/06/16	480
Saldo de pedidos em atraso	240
Estoque virtual em 01/06/16	720
Saldo de pedidos abertos para junho/16	1.440
Previsão de consumo para junho/16 (média dos últimos 6 meses)	1.520
Estoque virtual em 30/06/16	640
Saldo de pedidos abertos para julho e agosto/16	3.120
Previsão de consumo para julho, agosto e setembro/16	4.560
Estoque virtual em 30/09/16	-800
Quantidade de dias de estoque de segurança	5
Quantidade de material de estoque de segurança	380
Sugestão de compra para atender setembro/16	1.180

Múltiplo do item por embalagem	240
Lote mínimo do fornecedor	240
Curva	A
Quantidade real a comprar para setembro/16	1.200
Data adequada para 1ª entrega (conforme lead time)	09/09/2016
Dia da semana definido para entrega do material (chegada ao destino)	Segunda-feira
Datas para entregas e quantidades	13/09/16 = 480, 20/09/16 = 480 e 27/09/16 = 240
Status da análise da programação	Ok
Número do pedido	Z
Pedido enviado para fornecedor?	Sim
Recebimento confirmado pelo fornecedor?	Sim

Tabela 9. Dados para análise da programação de compra

Fonte: Dados da pesquisa.

Após as análises de item a item, são geradas as quantidades a serem compradas e, então, são transformadas em pedidos que são programados no sistema manualmente, enviados para os fornecedores e solicitado à confirmação de recebimento por e-mail. Esses pedidos são acompanhados com *follow-up* pelos analistas que asseguram o controle da operação para que não sobrem ou falem peças em estoque.

Considerações finais

O presente artigo tratou da programação de compras de itens de consumo indireto em uma montadora de veículos. Foram analisados parâmetros de classificação ABC para priorização de pedidos e gestão dos itens, programação por estoques, onde a gestão de compras é mediante o sistema de reposição periódica, com verificação do nível de estoque em intervalos fixos (mensalmente).

A implementação da classificação ABC ajudou a identificar os itens que devem receber maior atenção no momento da programação de compra, auxiliando na tomada de decisão de quanto comprar, evitando o excesso de estoque para os mesmos.

A gestão de compras por sistema de reposição periódico atende a necessidade para a programação de compra de itens indiretos, visto que a influência do *forecast* de produção não afeta proporcionalmente a demanda destes itens. Sobretudo, nota-se a dificuldade em controlar os itens que são descartados no processo, ou mesmo que tem consumo fora da média em determinados casos. Outro fator relevante não notado foi um sistema para controle de itens perecíveis. Grande parte destes itens tem perecibilidade, que influencia diretamente nos volumes de estoque, que devem ter acuracidade ainda maior do que o restante.

Além disso, os analistas controlam toda programação de compras por planilhas eletrônicas. A carência de um sistema integrado contribui negativamente nos processos de compras, visto que a programação é o resultado de entradas como previsão de utilização, saldo de estoque, pedidos em aberto etc. Sem entradas em níveis ótimos, o resultado da programação também refletirá o mesmo.

Conclui-se que o modelo de programação de itens indiretos desta organização consegue atender em nível primário a demanda do processo, mas ainda tem carências de quesitos essenciais para que seja realizada de maneira ótima.

O presente trabalho contribui para a área acadêmica por ser uma referência de aplicação prática de classificação ABC no processo de planejamento e controle de compras dos materiais indiretos. Para a área empresarial, contribui por reduzir os níveis de estoque, devido à visibilidade que os itens da curva A recebem no momento de planejar as próximas compras.

Sugere-se, como pesquisa futura, desenvolver ferramentas e processos que consigam suprir as carências expostas e evitar custos desnecessários com estoques. O *benchmark* é uma opção válida, pois diversas outras empresas também controlam itens perecíveis e que tem alto índice de perda no processo.

Referências

- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. 2016a. Disponível em: <<http://bit.ly/2QoN46p>>. Acesso em: 13 jan. 2017.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. 2017a. Disponível em: <<http://bit.ly/2MsZHKs>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- ANFAVEA. Estatísticas. 2015. Disponível em: <<http://bit.ly/2QoMzt3>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- ANFAVEA. Estatísticas. 2016b. Disponível em: <<http://bit.ly/2OeakSW>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- ANFAVEA. Estatísticas. 2017b. Disponível em: <<http://bit.ly/2MvQwbY>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- ARAGÃO, Alef Michael S. et al. Aplicação da curva ABC em uma empresa do setor atacadista no estado de Sergipe. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABEPRO, 2016.
- CORRÊA, Henrique L.; GIANESI, Irineu G. N.; CAON, Mauro. Planejamento, programação e controle da produção: MRP II / ERP: conceitos, uso e implantação; base para SAP, Oracle Applications e outros softwares integrados de gestão. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- DIAS, Marco Aurélio P. Administração de materiais: princípios, conceitos e gestão. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- _____. Administração de materiais: uma abordagem logística. São Paulo: Atlas, 1993.
- FLEURY, Paulo Fernando. Conceito de logística integrada e supply chain management. In: _____. WANKE, Peter; FIGUEIREDO, Kleber Fossati. Logística empresarial: a perspectiva brasileira. São Paulo. Atlas, 2000, p. 27-48.

- GODEIRO, Diego Philipe de; et al. Gestão de estoque: o caso de uma distribuidora de medicamentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABEPRO, 2016.
- LEENDERS, Mark A. A. M; WIERENGA, Berend. The effectiveness of different mechanisms for integrating marketing and R&D. Journal of product innovation management, v. 19, n. 4, 2002, p. 305-317.
- MARTINS, Roberto A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, Paulo Augusto C. (orgs.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012, p. 47-63.
- MIGUEL, Paulo A. C., SOUZA, Rui. O método do estudo de caso na engenharia de produção. In: _____. (org.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012, p. 131-147.
- MOREIRA, Daniel Augusto. Administração da produção e operações. 1. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.
- RONCHI, Laís Milanez; et al. Os reflexos da análise da curva ABC na gestão de estoques de uma empresa comercial de materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABEPRO, 2016.
- SILVA, Gleyci Kelly C. B.; MATEUS, Eline S.; SILVA, Andre Luiz G. Análise de sistema de estoques por meio de análise de curva ABC e giro de estoque: um estudo de caso numa organização hospitalar pública. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABEPRO, 2016.
- SLACK, Nigel; JOHNSTON, Robert; CHAMBERS, Slack. Administração da produção. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- SWERTS, Guilherme N. M.; et al. Implantação de programa de redução de custos em concessionária de veículos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABEPRO, 2016..

Notas

5. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: mbatistini2014@gmail.com.
6. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

Determinação do conteúdo efetivo em latas de cerveja: uma aplicação do controle estatístico do processo

*Débora Carneiro de Deus*⁷

*Luís Claudio Frazatto Prado*⁸

*Stella Jacyszyn Bachega*⁹

Resumo: Na busca por maior qualidade do processo com relação à variação de medidas, comparada às especificações, o controle estatístico do processo (CEP) apresenta benefícios na sua utilização, possibilitando testar a estabilidade do processo. O objetivo deste trabalho é aplicar a técnica de CEP para análise do conteúdo efetivo em latas de cerveja de 350 ml, produzidas por uma grande cervejaria atuante no mercado brasileiro. Para a realização dessa pesquisa, foi utilizada a abordagem de pesquisa quantitativa e o procedimento experimental. A análise e o acompanhamento do processo produtivo têm como intuito a diminuição da variabilidade do processo reduzindo a quantidade de produtos fora de especificações e, com isso, os custos da produção. Os resultados obtidos evidenciam o processo sob controle, porém, verificou-se que o produto excede a especificação do INMETRO, pois foram identificados valores acima do limite de 360,5 ml.

Palavras-chave: Controle Estatístico do Processo. Conteúdo Efetivo. Cervejaria.

Introdução

A qualidade de um produto ou serviço pode ser alcançada por meio do desenvolvimento de ações que visam o atendimento de especificações, com a

menor variabilidade possível e com custo mais adequado, o que caracteriza um fator competitivo no mercado. Assim, as empresas podem buscar destaque no mercado ao oferecerem produtos ou serviços com qualidade e com diferenciais que conquistem seus clientes.

O controle estatístico do processo (CEP) é um método que pode auxiliar o controle de especificações. Segundo Paladini (1990), o CEP está ligado ao controle estatístico da qualidade. Refere-se a um sistema de inspeção por amostragem, sendo aplicada à produção. Possui como intuito a redução da variabilidade para o gerenciamento do processo e seus reflexos nas características da qualidade do produto. Contribui para o aperfeiçoamento do processo produtivo. Salienta-se que a variabilidade pode representar um custo desnecessário de produção, gerando custos mais elevados.

Neste sentido, Davis, Aquiliano e Chase (2001) reforçam que o CEP trata de um método quantitativo para monitoramento de dado processo com a coleta de dados do processo em tempo real. A variação do processo a partir do desempenho atual, pode ser comparada ao parâmetro esperado, ao se aplicar o CEP. Montgomery (2004) destaca que o CEP possui foco na solução de problemas e advoga o seu uso para se obter estabilidade do processo e melhoramento da capacidade, ao se reduzir a variabilidade.

O CEP pode ser utilizado em diversos ramos de atividade e, também, em conjunto com outras técnicas para o alcance de um objetivo de melhoria maior, como pode ser visto em Alves et al. (2014), Colin e Vanhoucke (2015), Hdz-Jasso et al. (2015), Kosnik, Zhang e Durango-Cohen (2014), Lee et al. (2015), Lima et al. (2006), Oravec e Daniels (2014), Sa Junior et al. (2014), Seabra Junior et al. (2017), Souza, Domingos Filho e Samohyl (2007), Tian et al. (2017), entre outros.

Com base neste contexto, o objetivo do presente artigo é aplicar a técnica de controle estatístico do processo para análise do conteúdo efetivo em latas de cerveja de 350 ml, produzidas por uma grande cervejaria atuante no

mercado brasileiro. O CEP pode proporcionar à empresa uma base para diminuir a variabilidade de seus produtos e/ou processos, reduzindo, assim, gastos desnecessários.

Para cumprir o objetivo, o artigo é organizado da seguinte forma: na seção um é apresentado o referencial teórico; a seção dois expõe a metodologia utilizada nesta pesquisa; a seção três trata da discussão dos resultados, onde é abordado a aplicação das técnicas de Controle Estatístico de Processo e análise dos resultados obtidos; finalmente, a última seção apresenta as considerações finais.

1. Referencial teórico

1.1 Gestão da qualidade

Consolidado após a Segunda Guerra Mundial, o conceito do Sistema de Gestão da Qualidade tem evoluído para se adequar às novas e sucessivas tecnologias, com foco na redução dos custos e melhoria da competitividade, não deixando de lado as exigências dos consumidores.

Segundo Deming (1990), ao se diminuir a “variabilidade do processo” há o aumento da qualidade e da produtividade. Esta melhora propicia a conquista de mercados, pois a empresa se torna mais competitiva pela redução nos custos e pela própria qualidade de seus produtos.

Para Paladini (1990), a observação dos processos produtivos permite avaliar e controlar suas características já no desenvolvimento, uma vez que ao controlar o processo, o produto também estará controlado. As variações nos processos industriais são analisadas buscando informações precisas para identificar seus possíveis reflexos na qualidade final do produto e, com isso, também a melhoria contínua e atendimento das expectativas do cliente.

O processo de melhoria da qualidade, segundo Juran (1992), tem relação com a identificação e diminuição de perdas nos processos, mediante a implantação de soluções que buscam uma melhoria significativa adequando

às atividades executadas por meio de sucessivos projetos, para proporcionar satisfação aos clientes. A qualidade nos processos produtivos estabelece os objetivos e controles, monitorando e realizando os ajustes necessários.

Para auxiliar na gestão da qualidade há as ferramentas da qualidade. Estas são técnicas para atingir o controle do processo. Controlar a qualidade consiste em uma atividade intermitente dentro da organização, identificando os problemas via manuseio dessas ferramentas para coletar, processar e dispor as informações necessárias visando à melhor resolução de problemas (Juran, 1992).

Segundo Paladini (1997), a qualidade dos produtos produzidos pode ser atingida utilizando-se de ferramentas que, pela aplicação de técnicas estatísticas com dados coletados no processo produtivo, auxilia na organização e na estruturação deste próprio processo.

É possível destacar algumas ferramentas do controle da qualidade, as quais podem auxiliar no estabelecimento de melhoria contínua:

- Diagrama de Ishikawa: Possui, também, as denominações Diagrama de Causa e Efeito ou Diagrama Espinha-de-peixe. É uma representação gráfica que estrutura as possíveis causas de dado problema que contribuem para efeitos na qualidade dos produtos. É utilizado para identificar todas as causas possíveis de um problema de forma a obter uma melhor representação entre a causa e efeito decorrentes (Araújo, 2007);

- Fluxograma: É um diagrama que ilustra o fluxo entre os elementos que compõem o processo evidenciando todas suas etapas e a transição de informações das várias operações do processo. É uma ferramenta útil para implantação de um projeto, permite a visualização dos pontos de melhoria e analisar se os vários passos do processo estão correlacionados (Araújo, 2007);

- Diagrama de Pareto: É um diagrama de barras que identifica os itens de forma a classificar o número de ocorrências dos problemas da qualidade,

ordenando as ocorrências (causas) do maior para o menor. É útil na determinação das causas mais importantes em relação ao seu total, permitindo assim focar as ações corretivas em função das não conformidades mais significativas de um projeto (Araújo, 2007).

Dentre as ferramentas da qualidade há também o CEP, que utiliza gráficos de controle com métodos estatísticos para verificar o comportamento do processo e se ele está dentro dos limites preestabelecidos. Tal ferramenta é apresentada na próxima subseção.

1.2 Controle estatístico do processo

O CEP permite a detecção de problemas no processo produtivo quanto à variação de medidas, comparado às especificações dos produtos. Para Davis, Aquiliano e Chase (2001), o CEP trabalha com dados de amostragem do processo coletando medições em tempo real e as comparando aos dados de medida padrão do produto. Permite que o processo possa operar com a menor variabilidade possível.

Para testar a estabilidade de um processo, segundo Montgomery (2004), é recomendado tomar de 20 a 25 amostras. Estas são obtidas por meio de dados coletados no processo para a construção do gráfico de controle. Realizado a construção do gráfico de controle, analisa-se se não há variação que excedam os limites de controle. Caso ocorram pontos que excedam os limites de controle, considera-se que o processo não se encontra sob controle estatístico. Considera-se que o processo está sob controle estatístico, se todos os pontos estiverem dentro dos limites de controle. Quando ocorrer causas especiais é necessário buscar, eliminar e prevenir sua repetição, refazendo o processo até concluir que o processo encontra-se estável, e que os pontos estejam sob controle.

O modo como a coleta de dados deve ser procedida é a que segue. É necessário coletar m amostras (subgrupos racionais). Cada amostra contém n

observações da característica da qualidade em análise. Normalmente, m está pelo menos, entre 20 a 25 amostras e n é igual a 4,5, 6 etc. (Farias, 2014).

O objetivo do CEP é detectar desvios de especificações, reduzindo custos e aumentando a qualidade no processo produtivo. Os gráficos de controle são uma das principais ferramentas utilizadas no CEP. Há o uso de dados estatísticos de medições de variáveis de interesse para a detecção de desvios ou estabilidade no processo (Juran, 1992; Montgomery, 2004).

O princípio do CEP é agir de forma a evitar defeitos, atuando sobre o processo produtivo com uso de estatística e gráficos de controle para análise de informações do processo e para verificar se um processo está ou não sob controle (dentro das especificações). Os gráficos de controle permitem analisar as flutuações (variações) de dados coletados durante o processo, comparados aos limites de controle estabelecidos para busca de correção na qualidade do processo caso os dados estejam fora desses limites preestabelecidos (Paladini, 1990).

A característica de qualidade deve ser monitorada por meio de gráficos de controle, para verificar se a variação no processo segue uma distribuição normal de estabilidade (processo sob controle). Usa-se um gráfico de controle da média e de outro para controlar o desvio-padrão (gráfico da amplitude), que são grandezas que medem a variabilidade no sistema produtivo (Martins; Laugeni, 2005).

No gráfico de controle, conforme Martins e Laugeni (2005), há o limite inferior, denominado LIC (Limite Inferior de Controle), o limite superior, denominado LSC (Limite Superior de Controle) e a linha de centro, denominada LM (Linha Média) ou LC (Linha Central).

Os limites de controle da média e a linha central são calculados conforme as equações 1, 2 e 3 a seguir (Martins; Laugeni, 2005):

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (1)$$

$$LC = \bar{\bar{x}} \quad (2)$$

$$LIC = \bar{x} - A_2 R \quad (3)$$

Onde, **A₂** é uma constante tabelada para diversos tamanhos de amostras, é a média das médias parciais, **R** é a amplitude média e **m** trata-se das amostras coletadas. A seguir são apresentadas outras equações utilizadas, vide equações 4, 5 e 6, onde **R** é a amplitude, **x** é a observação e $\bar{x}$ é a média das observações (Martins; Laugeni, 2005):

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (4)$$

$$R = X_{\max} - x_{\min} \quad (5)$$

$$R = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (6)$$

Os limites de controle para o gráfico da amplitude e a linha central são calculados conforme as equações 7, 8 e 9 (Martins; Laugeni, 2005):

$$LSC = D_4 R \quad (7)$$

$$LC = R \quad (8)$$

$$LIC = D_3 R \quad (9)$$

Onde, **D₄** e **D₃** são constantes tabeladas para vários tamanhos de amostras.

2. Metodologia

A abordagem da pesquisa pode ser interpretada, segundo Bryman (1989), como quantitativa ou qualitativa.

Nesta pesquisa, a abordagem quantitativa foi utilizada por envolver dados quantitativos uma vez que foi feito um experimento referente à medição da quantidade de cerveja em mililitros contidos em latas de cervejas envasadas e prontas para o consumo, permitindo, assim, o controle por meio de dados numéricos.

O procedimento de pesquisa experimental tem o objetivo de checar as relações de causa e efeito, onde o pesquisador pode manipular as variáveis independentes, checando as mudanças apresentadas nos resultados em virtude das manipulações (Creswell, 2013). Nas abordagens quantitativas, de acordo com Bryman (1989), a pesquisa experimental é a mais indicada. Portanto, este procedimento foi utilizado neste trabalho.

A empresa da marca estudada tem uma produção anual estimada de 110 milhões de latas de cerveja, portanto, uma produção média de 9.166.000 latas por mês. Selecionado o objeto de estudo, a coleta de dados foi o primeiro passo. Nesta pesquisa foi realizada a coleta de dados por meio da aquisição de latas de cerveja em gôndolas de supermercados de maneira aleatória, concentrando em uma única marca.

O conteúdo das latas foi verificado por meio de uma proveta graduada para medir os mililitros de cada uma, visando detectar a variabilidade no conteúdo das latas de cerveja de 350 ml adquiridas. Assim, os dados amostrais apresentam a variação em mililitros da quantidade de cerveja em cada lata, como mostra a Figura 9. Nota-se que a medida do conteúdo de uma das latas de cerveja analisadas foi de 360 ml.



Figura 9. Coleta de Dados das Amostras

Fonte: Dados da pesquisa.

Para a coleta de variáveis do processo, foi obtida uma amostra de 22 subgrupos racionais (m) e cada uma contendo 6 observações (n). Realizada a coleta de dados, foi feita a construção de gráficos de controle por meio do estabelecimento dos limites de controle (Linha Central-LC, Limite Superior de Controle-LSC e Limite Inferior de Controle-LIC). Os cálculos e gráficos foram feitos por meio da planilha eletrônica Excel[®].

O procedimento seguinte foi o estudo dos gráficos de controle para verificação do processo, identificando se ele está ou não sob controle estatístico. Os gráficos de controle trabalham com as variações dos dados coletados pertinentes ao processo. Estas variações podem apontar a presença de problemas no processo, ao serem analisados os limites estabelecidos no

gráfico. Feitas todas as considerações, foi possível avaliar se o processo é capaz de atender às especificações de controle da qualidade.

A partir da análise estatística do processo, podem ser sugeridas mudanças que possam proporcionar à empresa melhorias de qualidade nos produtos, para assim reduzir substancialmente o custo de produção.

3. Discussão e resultados

A Tabela 10 mostra os dados coletados e os resultados obtidos para as médias e amplitudes.

Número do subgrupo (m)	Observações						Média	Amplitude (R)
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆		
1	365	370	380	355	360	368	366,3	25
2	355	380	360	365	375	365	366,7	25
3	375	370	360	368	360	370	367,2	15
4	358	360	355	369	360	352	359,0	17
5	370	355	367	360	360	365	362,8	15
6	370	360	368	365	360	360	363,8	10
7	355	360	372	360	380	368	365,8	25
8	352	353	355	354	372	357	357,2	20
9	361	350	364	356	353	351	355,8	14
10	354	370	352	362	356	367	360,2	18
11	351	359	356	354	361	352	355,5	10
12	359	371	358	357	356	349	358,3	22
13	357	361	356	352	367	355	358,0	15
14	365	353	359	372	356	363	361,3	19
15	356	352	357	349	371	346	355,2	25
16	362	350	358	374	352	353	358,2	24
17	373	356	352	350	354	360	357,5	23
18	368	358	372	365	357	353	362,2	19

19	352	349	372	356	363	365	359,5	23
20	346	354	353	361	369	356	356,5	23
21	365	356	364	358	352	356	358,5	13
22	367	372	354	356	352	357	359,7	20

Tabela 10. Dados Coletados das Amostras

Fonte: Dados da pesquisa.

Considerando o tamanho da amostra com **n = 6** observações e com a análise da Tabela 11, foi possível extrair os valores das constantes **A₂**, **D₄** e **D₃** para a realização dos cálculos dos limites de superioridade e inferioridade.

Observações na amostra (n)	Médias		Desvio-padrão		Amplitudes	
	A ₂	A ₃	B ₃	B ₄	D ₃	D ₄
2	1,880	2,659	0,000	3,267	0,000	3,267
3	1,023	1,954	0,000	2,568	0,000	2,574
4	0,729	1,628	0,000	2,266	0,000	2,282
5	0,577	1,427	0,000	2,089	0,000	2,114
6	0,483	1,287	0,030	1,970	0,000	2,004
7	0,419	1,182	0,118	1,882	0,076	1,924
8	0,373	1,099	0,185	1,815	0,136	1,864
9	0,007	1,032	0,239	1,761	0,184	1,816
10	0,308	0,975	0,284	1,716	0,223	1,777
11	0,285	0,927	0,321	1,679	0,256	1,744
12	0,266	0,886	0,354	1,646	0,283	1,717
13	0,249	0,850	0,382	1,618	0,307	1,693
14	0,235	0,817	0,406	1,594	0,328	1,672
15	0,223	0,789	0,428	1,572	0,347	1,653
16	0,212	0,763	0,448	1,552	0,363	1,637
17	0,203	0,739	0,466	1,534	0,378	1,622

18	0,194	0,718	0,482	1,518	0,391	1,608
19	0,187	0,698	0,497	1,503	0,403	1,597
20	0,180	0,680	0,510	1,490	0,415	1,585
21	0,173	0,663	0,523	1,477	0,425	1,575
22	0,167	0,647	0,534	1,466	0,434	1,566
23	0,162	0,633	0,545	1,455	0,443	1,557
24	0,157	0,619	0,555	1,445	0,451	1,548
25	0,153	0,606	0,565	1,435	0,459	1,541

Tabela 11. Constantes para a construção de Gráficos de Controle

Fonte: Adaptada de Montgomery (1991).

Como pode ser visto na Tabela 12, foi calculada a média das médias e a amplitude. Os valores das constantes A₂, D₃ e D₄, que também constam nesta tabela, foram extraídos da Tabela 11.

Média das médias 360,200	
Amplitude média	19,100
A ₂	0,483
D ₃	0,000
D ₄	2,004

Tabela 12. Média das médias, Amplitude e Constantes

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 13, observam-se os resultados dos Limites de Controle para o gráfico da média, onde LSC é o Limite Superior de Controle, LC é o Limite de Controle e LIC o Limite Inferior de Controle, como também os valores de especificação do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) superior e inferior para o valor nominal de 350 ml.

Gráfico das médias	
LSC	369,5
LC	360,2
LIC	351,0
INMETRO (superior)	360,5
INMETRO (inferior)	339,5

Tabela 13. Limites de superioridade, inferioridade e especificação do INMETRO para o gráfico da média

Fonte: Dados da pesquisa.

Com a utilização dos limites de controle para o gráfico da média, calculados na Tabela 13, e com os valores das médias, calculados na Tabela 10, foi obtido o Gráfico de Controle da Média como mostra a Figura 10. Nesta figura, é possível observar que os valores marcados no gráfico estão dentro dos limites de controle e não apresentam disposição de pontos sucessivos, de forma atípica, localizados de um mesmo lado da linha de controle (LC), ou seja, estão dispostos de forma aleatória, podendo caracterizar um processo sob controle.

Considerando que a norma nº NIE-DIMEL-025 (INMETRO, 2011) determina que a tolerância permitida para produto pré-medido de valor nominal de 300 a 500 ml será de 3%, observou-se que o produto excede a especificação do INMETRO, pois foram identificados valores acima do limite de 360,5 ml. Estes valores podem ser visualizados na Figura 10. Neste estudo, a coleta de 132 amostras mostrou que 51 amostras estão acima do especificado.

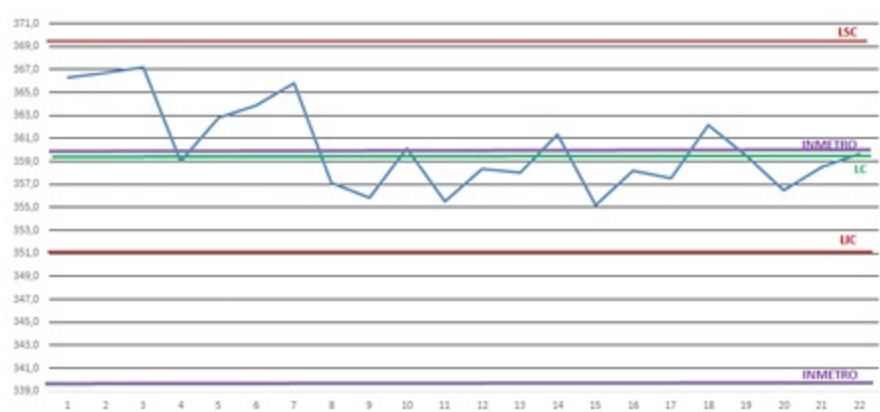


Figura 10. Gráfico de Controle da Média

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 14 apresenta os resultados dos Limites de Controle para o gráfico da amplitude, evidenciando o Limite Superior de Controle (LSC), a Linha Central (LC) e o Limite Inferior de Controle (LIC).

Gráfico das Amplitudes	
LSC	38,3
LC	19,1
LIC	0

Tabela 14. Limites de Superioridade e Inferioridade para o gráfico da amplitude

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 11 há o Gráfico de Controle da Amplitude, obtido a partir da utilização dos limites de controle para o gráfico da Amplitude, calculados na Tabela 14, e com os valores das amplitudes, calculados na Tabela 10. Com a análise da Figura 11, é possível observar que os valores marcados no gráfico estão dentro dos limites de controle e não apresentam uma sequência de pontos não-aleatória de um mesmo lado da LC, evidenciando um processo estável, ou seja, sob controle.

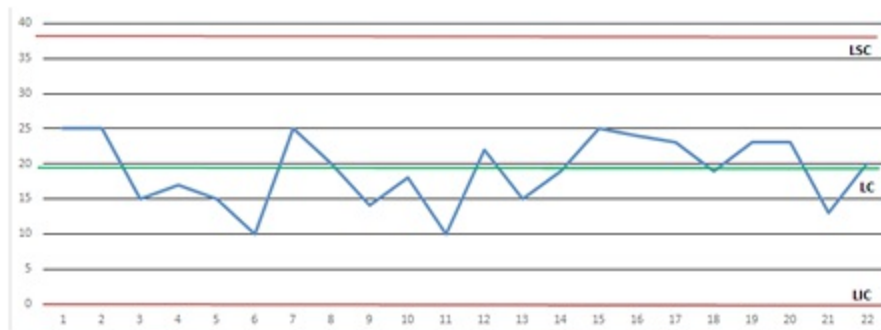


Figura 11. Gráfico de Controle da Amplitude

Fonte: Dados da pesquisa.

Considerações finais

O presente trabalho foi elaborado a partir do uso da técnica de controle estatístico do processo para verificação da quantidade de cerveja envasada em latas de 350 ml. Neste processo, é importante salientar a aplicação de técnicas para controlar a qualidade, para que a relação custo versus benefício seja bastante vantajosa e a redução da variabilidade no processo apresente benefícios em relação ao custo.

Sendo assim, a verificação da variabilidade no processo de envase de cerveja foi analisada por meio do uso de gráficos de controle. Com a análise dos gráficos de controle das Figuras 10 e 11, foi possível constatar que o produto encontra sob controle estatístico do processo.

No entanto, ao se comparar com as especificações do Inmetro, verificou-se amostras que excedem a tolerância de 3% do conteúdo nominal (para conteúdo nominal de 300 a 500 ml). Para o valor nominal de 350 ml, a tolerância é de 360,5 ml superior e 339,5 ml inferior. Considerando a amostra de 132 latas, identificou-se que 51 amostras estão acima do especificado. A análise destas medidas permite calcular qual a perda da empresa para cada litro de cerveja produzido. Esta perda corresponde a um valor médio de 8,63 ml para cada litro de cerveja envasado.

Este trabalho contribui para promover maior divulgação e compreensão, nos meios acadêmico e empresarial, do emprego da técnica CEP para melhoria de processos produtivos. A aplicação do CEP para melhoria da variabilidade de produtos, que neste artigo foi latas de cerveja, evidencia que esta técnica pode ser empregada de forma rotineira em cervejarias, auxiliando na identificação de causas de não conformidades que possam ocorrer nos processos de produção.

Especificamente no caso estudado, um maior controle da qualidade na variação verificada, por parte da empresa de cerveja, pode representar uma relevante redução nos custos, uma vez que a empresa possui uma produção em larga escala.

Como sugestões de pesquisas futuras, tem-se:

- Implementação do controle estatístico do processo no envase da cerveja para verificação de como o processo se comporta frente às exigências de normas pré-estabelecidas por órgãos regulamentadores;
- Análise de custos mais aprofundada, levando em consideração a redução da variabilidade de quantidade de cerveja contida em latas de 350 ml;
- Aplicação de cartas de controle mais elaboradas, realizando uma análise mais minuciosa do processo;
- Definição de uma metodologia para solução de problemas, possibilitando à empresa eliminar ao máximo os problemas observados com a variabilidade em seus produtos.

Referências

- ALVES, Thiago Fernando P.; et al. Análise do programa de bem-estar animal de um frigorífico de aves através do controle estatístico do processo (CEP). In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 34, 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABEPRO, 2014. p. 1-19.
- ARAÚJO, Luis Cesar G. **Organização, Sistemas e métodos e as tecnologias de gestão organizacional**: arquitetura organizacional, benchmarking,

- empowerment, gestão pela qualidade total, reengenharia. 3. ed. São Paulo: Atlas, v. 1, 2007.
- BRYMAN, Alan. **Research methods and organization studies**. London: Uniwin Hyman, 1989.
- COLIN, Jeroen; VANHOUCKE, Mario. Developing a framework for statistical process control approaches in project management. **International Journal of Project Management**, v. 33, n. 6, p. 1289-1300, 2015.
- CRESWELL, John W. **Research design: qualitative & quantitative approaches**. 4. ed. London: Sage, 2013.
- DAVIS, Mark M.; AQUILANO, Nicholas J.; CHASE, Richard B. **Fundamentos de Administração da Produção**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- DEMING, William Edwards. **Qualidade: a revolução da administração**. Rio de Janeiro: Editora Marques-Saraiva, 1990.
- FARIAS, Anderson. **Ferramentas Avançadas da Qualidade**. 14p. s.d. Disponível em: <<http://bit.ly/2CTSjrW>>. Acesso em: 18 nov. 2014.
- HDZ-JASSO, A. M.; et al. Experimental heat transformer monitoring based on linear modelling and statistical control process. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 1271-1286, 2015.
- INMETRO, **Determinação do Conteúdo Efetivo de Produto Pré-medido de Conteúdo Nominal Igual Comercializado em Unidade de Massa**. Norma nº NIE-DIMEL-025, Rev. 4, jul. 2011. Disponível em: <<http://bit.ly/2Oiguf>>. Acesso em: 01 dez. 2014.
- JURAN, J. M. **A qualidade desde o projeto: os novos passos para o planejamento da qualidade de produtos e serviços**. São Paulo: Cengage Learning, 1992.
- KOSNIK, David E.; ZHANG, Weizeng; DURANGO-COHEN, Pablo L. Application of statistical process control for structural health monitoring of a historic building. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 20, n. 1, 2014.
- LEE, Shui-Pin; et al. Integrated statistical process control and engineering process control for a manufacturing process with multiple tools and multiple products. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 32, n. 3, p. 174-185, 2015.
- LIMA, A. A. N.; et al. Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e**

- Aplicada**, v. 27, n. 3, p. 177-187, 2006.
- MARTINS, Petronio G.; LAUGENI, Fernando Piero. **Administração da Produção**. 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2005.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- _____. **Introduction to Statistical Quality Control**, 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- ORAVEC, Heather A.; DANIELS, Christopher C. Implementation of statistical process control: Evaluating the mechanical performance of a candidate silicone elastomer docking seal. In: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 50, 2014, **Proceedings...** AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2014.
- PALADINI, Edson P. **Qualidade total na prática – implantação e avaliação de sistema de qualidade total**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1997.
- _____. **Controle de Qualidade: Uma abordagem abrangente**. São Paulo: Atlas, 1990.
- SA JUNIOR, J. I.; et al. Aplicação das ferramentas de controle estatístico da qualidade no sistema de pesagem em uma unidade de beneficiamento de refresco. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 34, 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABEPRO, 2014. p. 1-18.
- SEABRA JUNIOR, Edward; et al. Statistical and quality control tools applied to the process of wooden furniture production. **International Wood Products Journal**, v. 8, n. 3, p. 161-165, 2017.
- SOUZA, Gueibi P.; DOMINGOS FILHO, Manoel; SAMOHYL, Robert W. Aplicação dos conceitos de Controle Estatístico de Processo (CEP) em uma indústria de fundição do Norte Catarinense. **Revista Produção Online**, v. 7, n. 2, p. 64-84, ago. 2007.
- TIAN, Wenmeng; et al. A. Statistical process control for multistage processes with non-repeating cyclic profiles. **IISE Transactions**, v. 49, n. 3, p. 320-331, 2017.

Notas

7. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: debora.deus@yahoo.com.br.

- 8.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: luisprado@mmcb.com.br.
- 9.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

Análise dos métodos de cálculo de esforços de flexão em lajes nervuradas bidirecionais

*Leonardo Sales Duarte*¹⁰

*Wanderlei Malaquias Pereira Junior*¹¹

*Charles Myller Pereira Batista*¹²

*Antover Panazollo Sarmento*¹³

RESUMO: Este trabalho pretende realizar um estudo teórico para examinar o comportamento da flexão em lajes nervuradas bidirecionais. Para isso, utilizou-se três métodos diferentes para obtenção dos esforços: (a) Analogia de Grelha; (b) Método dos Elementos Finitos (MEF); (c) Tabelas de cálculo. Neste artigo, foi utilizado o software RISA-3D da Risa Technologies nas simulações computacionais, que tiveram como objetivo automatizar os cálculos via grelha e MEF. As simulações aqui apresentadas consideraram o comportamento elástico do material (concreto). Diante das simulações realizadas, a grelha (sem torção) e as tabelas (com correção) pareceram se mostrar como os melhores métodos, pois conseguiram aliar praticidade no cálculo e resultados mais conservadores, ressaltando que tal conservadorismo se manteve evidente apenas nas lajes quadradas. Comparado à grelha (com torção), o MEF se mostrou sempre e certamente mais favorável à segurança. Ainda quanto à segurança dos resultados, para o caso das lajes quadradas analisadas, o MEF se mostrou claramente menos conservador do que a grelha (sem torção) e do que as tabelas (com correção), mas isso não foi observado nas retangulares. Apesar de não costumar ser o método mais conservativo, o MEF é um bom

método, principalmente se houver necessidade de avaliar as tensões internas atuantes na laje, o que não é possível com nenhum dos outros métodos.

Palavras-chave: lajes nervuradas, tabelas usuais, analogia de grelha, elementos finitos.

Introdução

As lajes nervuradas podem ser uni ou bidirecionais. Quanto aos modelos de cálculo, apesar de haverem questionamentos quanto à consideração da rigidez transversal nas lajes unidirecionais, a NBR 6118 da ABNT (2014) afirma que o cálculo deve ser realizado no sentido da nervura, desprezando a rigidez transversal e a rigidez à torção. Portanto, nesse caso, basta usar o modelo usual de viga simplesmente apoiada. Já no caso das bidirecionais, se faz necessário considerar a rigidez nas duas direções e o simples modelo de vigas apoiadas não se adequa mais. Para o cálculo bidirecional, deve ser usado algum método capaz de representar o pavimento nas duas direções, por exemplo, Analogia de Grelha, Método dos Elementos Finitos (MEF) e até mesmo as tradicionais tabelas de cálculo.

Dessa maneira, este artigo objetiva realizar uma análise comparativa dos momentos fletores obtidos com os métodos citados para o caso de lajes nervuradas bidirecionais.

Por ser um assunto pouco discutido nas graduações de engenharia civil, o cálculo de lajes nervuradas bidirecionais é, muitas vezes, uma incógnita para muitos estudantes e até profissionais, sobretudo quando se trata do desenvolvimento de modelos computacionais e seu comportamento à flexão. Por isso, é de suma importância o desenvolvimento desta pesquisa para agregar conhecimentos técnicos à essa área de estudo.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, serão utilizados: Analogia de Grelha, Elementos Finitos e Tabelas de cálculo, que podem ser encontradas em Carvalho e Figueiredo Filho (2013). As simulações computacionais serão

realizadas por meio do software RISA-3D da Risa Technologies. Os cálculos serão realizados para diversos modelos de lajes e com carregamentos diferentes (2, 4, 6, 8 e 10 kN/m²). Todos os cálculos realizados serão elásticos e os módulos de elasticidade longitudinal e transversal do concreto estão de acordo com a NBR 6118 da ABNT (2014).

1. Desenvolvimento

1.1 Determinação dos esforços por Analogia de Grelhas

O método fundamenta-se em simular, através de uma grelha, uma laje, de maneira que as duas direções da laje sejam representadas por elementos que possam reproduzir as rigidezes da laje em cada direção (Barboza, 1992).

Este é um dos métodos mais usados, presente inclusive em muitos programas, ademais, permite o cálculo associando lajes às vigas, permitindo assim que a flexibilidade dos apoios seja considerada no cálculo (Araújo, 2014).

No caso de lajes maciças, deve se ter todo um cuidado com o refinamento da malha da grelha, já no caso de lajes nervuradas, o espaçamento entre os elementos do reticulado deve ser igual ao inteixixo (a_1) definido previamente na geometria da laje, como pode ser visto na Figura 12.

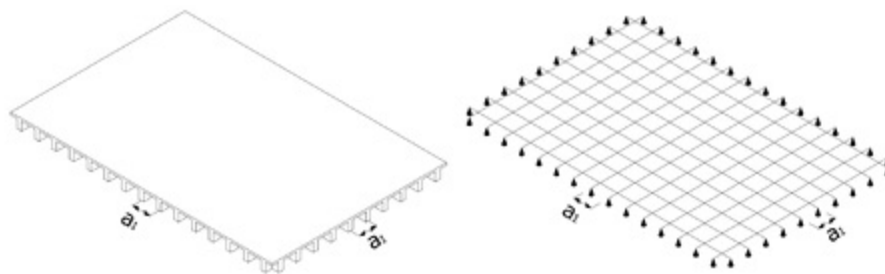


Figura 12. Laje nervurada em grelha equivalente

Fonte: Próprio autor

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2013), há dois tipos de propriedades geométricas a serem definidas em um pavimento em grelha, as

propriedades referentes às vigas (com mesa colaborante) e as referentes às lajes. Nesse trabalho será usado apenas elementos que representam a laje.

O momento de inércia a flexão das nervuras será calculado conforme a equação obtida na obra de Carvalho e Figueiredo Filho (2013) para seções T no estágio I:

$$I_T = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{(b_w \cdot h^3)}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot (y_{cg} - h_f/2)^2 + b_w \cdot h \cdot (y_{cg} - h/2)^2 \quad (1)$$

Em que:

I_T – momento de inércia à flexão da seção T;

b_f – largura da mesa;

b_w – largura da alma;

h_f – espessura da mesa;

h – altura total;

y_{cg} – distancia da face superior da mesa ao centroide da seção.

O momento de inércia à torção das nervuras será calculado, de maneira simplificada, pela mesma equação utilizada por Carvalho e Pinheiro (2013):

$$J_T = \sum_{i=1}^n \frac{c_i \cdot v_i^3}{3} \quad (2)$$

Em que:

J_T – momento de inércia à torção para seções compostas;

v – maior dimensão da seção retangular;

c – menor dimensão da seção retangular;

$n = 2$, pois se trata do número de retângulos para formar uma seção T.

Quanto ao carregamento na grelha, podem ser usadas cargas distribuídas sobre as barras, cargas concentradas diretamente nos nós ou nos elementos da grelha, aplicadas conforme suas áreas de influência (Henrichs, 2003). Na definição das áreas de influência, não será considerada a presença dos

elementos de viga, por isso, as áreas de influência próximas aos bordos serão definidas de modo que todo o carregamento seja transferido integralmente às nervuras próximas aos bordos, como na Figura 13. Nesse trabalho, não serão usadas cargas concentradas sobre as barras da grelha, que é uma das opções citadas por Hennrichs (2003).

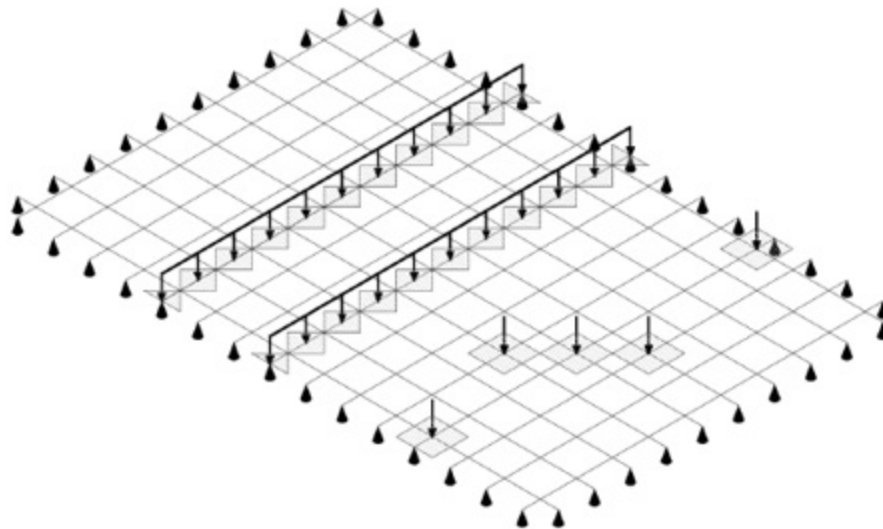


Figura 13. Carregamento linear ou concentrado nos nós

Fonte: Próprio autor

1.2 Determinação dos esforços por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF)

A solução via MEF é um artifício numérico bastante utilizado em diversos problemas da engenharia (Soriano, 2003).

Soriano (2003, p. 4) afirma ainda que:

No método de elementos finitos, o domínio de definição do modelo matemático é dividido em um número discreto de subdomínios ou elementos de dimensões finitas denominados *elementos finitos*, interligados por meio de um número reduzido de pontos denominados *nodais*.

No caso de lajes maciças, os elementos costumam ser bidirecionais, já no caso de lajes nervuradas, é mais coerente empregar elementos finitos tridimensionais ou sólidos.

De acordo com Soriano (2003), a utilização do MEF só se justifica quando empregada com o auxílio de sistemas programados (softwares), pois o método utiliza um elevado número de elementos finitos. O software utilizado nesta pesquisa possui uma interface gráfica amigável e os resultados podem ser visualizados em tabelas e, em alguns casos, em escalas de cores.

Vale destacar que não é objetivo deste artigo aprofundar-se nos fundamentos matemáticos e nas peculiaridades do MEF. Tão somente será empregado um software que utilize essa ferramenta a fim de simular o comportamento de lajes nervuradas bidirecionais.

No caso do RISA-3D, as tensões atuantes nos elementos sólidos serão obtidas na escala de cores e, em seguida, serão convertidas em momentos fletores por meio da equação clássica da resistência dos materiais, obtida em Margarido (2001):

$$\sigma = \frac{M}{I_s} \cdot z \quad (3)$$

Em que:

σ – tensão atuante;

M – momento fletor;

I_s – momento de inércia à flexão da seção;

z – distância da tensão estudada até o centroide da seção.

1.3 Determinação dos esforços via tabelas de lajes maciças

Lajes nervuradas bidirecionais podem ser simplificadas como lajes maciças utilizando-se o conceito de altura equivalente apresentado por Ji et al.¹⁴ (1985) apud Barbirato (1997).

O artifício fundamenta-se em simular o comportamento de uma laje nervurada através de uma maciça (Barbirato, 1997). Dessa maneira, basta calcular a estrutura como laje maciça por meio de alguma tabela de cálculo.

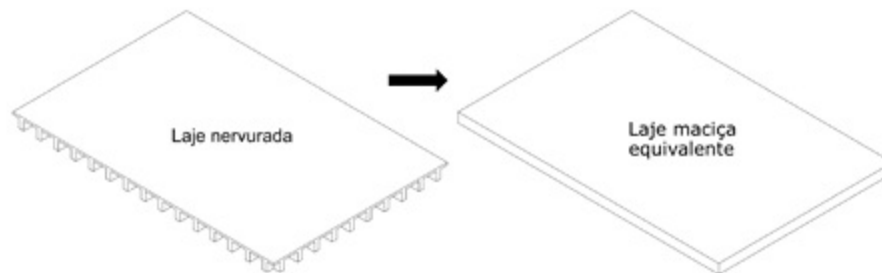


Figura 14. Laje nervurada e maciça equivalente

Fonte: Próprio autor

Para determinar a altura correspondente da uma laje maciça, conforme Ji et al.⁵ (1985) apud Barbirato (1997), pode ser usada a seguinte equação:

$$h_{eq} = \left(\frac{12 \cdot I}{a_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Em que:

h_{eq} – altura equivalente;

I – momento de inércia à flexão da seção T;

a_1 – entreixo entre as nervuras.

As tabelas possibilitam obter os momentos fletores e deslocamentos máximos e, para isso, basta conhecer a forma e as condições de apoio das lajes (Carvalho; Figueiredo Filho, 2013).

As vinculações dos bordos das lajes maciças podem se diversificar e criar vários casos de contorno para as lajes. Neste trabalho, serão utilizadas tabelas que podem ser encontradas em Carvalho e Figueiredo Filho (2013), onde são observados ao todo nove casos de vinculações. Os momentos fletores podem ser obtidos com a seguinte equação de Carvalho e Figueiredo Filho (2013).

$$M = \mu \cdot \frac{q \cdot l_x^2}{100} \quad (5)$$

Em que:

M – momento fletor positivo (m_x , m_y) ou negativo (m_x , m_y);

q – carregamento distribuído sobre a laje;

l_x – menor lado da laje;

μ – coeficientes tabelados (dependem da vinculação e do parâmetro $\lambda = l_y/l_x$).

Carvalho e Pinheiro (2013), afirmam que as lajes nervuradas não conseguem reproduzir os mesmos momentos torsores atuantes nas lajes maciças e, por isso, os fletores e flechas acabam sendo maiores nas nervuradas.

Hahn¹⁵ (1972) apud Carvalho e Pinheiro (2013) propõe multiplicar os valores dos esforços por um coeficiente (δ) e, assim, corrigir os valores obtidos presumindo-se a laje como maciça. Vale lembrar que os esforços que Carvalho e Pinheiro (2013) corrigem em sua obra são apenas os momentos fletores atuantes. O fator δ usado neste artigo pode ser obtido em Hahn (1972) apud Stramandinoli (2003) por meio da seguinte equação:

$$\delta_x = \delta_y = \frac{1}{\left(1 - \frac{5}{6} \cdot \frac{\epsilon^2}{1 + \epsilon^4}\right)} \quad (6)$$

Em que:

δ_x ou δ_y – coeficientes (válidos para o caso de bordos apoiados);

ϵ – relação entre os lados da laje.

O momento final corrigido é então dado por: $M_{\text{HAHN}} = M \cdot \delta$

2. Materiais e métodos

O trabalho se enquadra como uma pesquisa exploratória no âmbito do estudo de lajes nervuradas e seus métodos de determinação dos esforços. A seguir serão apresentados os modelos e procedimentos de análise realizados neste trabalho, a fim de atender aos objetivos previamente destacados.

2.1 Procedimento de modelagem e plano de análise

Inicialmente idealizou-se uma laje nervurada conforme apresentado na Figura 15. No caso foram simulados sete tipos de lajes com diferentes valores em suas dimensões.

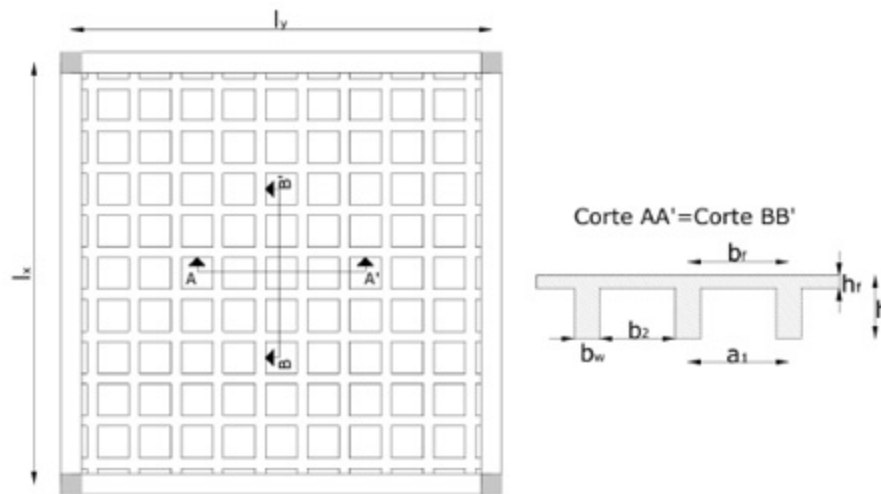


Figura 15. Modelo genérico de laje nervurada (LN)

Fonte: Próprio autor

São apresentadas, na tabela 15, informações sobre as lajes estudadas.

Modelo da LN	Cargas (kN/m ²)	l_x (cm)	l_y (cm)	Lambda (l_y/l_x)	h_f (cm)	h (cm)	b_w (cm)	$a_1=b_f$ (cm)
1	2, 4, 6, 8 e 10	300	300	1,00	5	20	10	50
2	2, 4, 6, 8 e 10	350	350	1,00	5	20	10	50
3	2, 4, 6, 8 e 10	400	400	1,00	5	20	10	50
4	2, 4, 6, 8 e 10	450	450	1,00	5	20	10	50
5	2, 4, 6, 8 e 10	300	400	1,33	5	20	10	50

6	2, 4, 6, 8 e 10	300	500	1,67	5	20	10	50
7	2, 4, 6, 8 e 10	300	600	2,00	5	20	10	50

Tabela 15. Carregamentos e dimensões conforme modelo de laje

Fonte: Próprio autor.

Quanto às vinculações das LN, este estudo limitou-se ao caso de bordos apoiados, pois, conforme Carvalho e Pinheiro (2013), as seções T trabalham bem na presença dos momentos positivos, mas não na presença dos negativos, para os quais exige-se, por exemplo, que se torne maciça a região dos apoios.

Para a simulação foram adotadas 5 maneiras diferentes para avaliação dos esforços de flexão, ou momentos. Primeiramente, duas maneiras envolvendo o conceito de Tabelas, duas envolvendo o conceito de Analogia de Grelhas e por fim o Método dos Elementos Finitos (MEF).

As simulações de Tabela foram nominadas de T e TH, a primeira utilizando apenas os coeficientes das tabelas e a segunda utilizando as tabelas, porém os momentos são corrigidos com o fator proposto na Equação (6). Para o método da grelha foi utilizada duas formas básicas: (a) AG que utiliza o método supracitado com rigidez à torção; (b) AG0, que também utiliza analogia de grelha, porém zerando a rigidez à torção das nervuras. A última simulação é a aplicação do MEF com elementos sólidos do RISA-3D.

Para determinação das diversas propriedades mecânicas do concreto utilizou-se as orientações da NBR 6118 da ABNT (2014) em relação a um f_{ck} dado. O f_{ck} adotado é de 20 MPa logo o valor do Módulo de elasticidade longitudinal (E) é 21287,3671 MPa, Módulo de elasticidade transversal (G) é 8869,7363 MPa e o coeficiente de Poisson 0,20.

Com a intenção de agrupar os métodos de cálculo utilizados que apresentam semelhança entre seus resultados, ajustaram-se modelos de regressão linear ($Y=A+Bx$) para cada método adotado na determinação dos momentos X e Y em função dos carregamentos para cada laje nervurada

analisada. Os parâmetros obtidos (A e B) pelos modelos avaliados foram considerados variáveis dependentes e submetidos à análise de agrupamento pelo método hierárquico aglomerativo de ligação completa e distância euclidiana média.

No método hierárquico os dados analisados mais semelhantes entre si são agrupados por similaridade sucessivamente, até que todos os subgrupos pertençam a um único grupo (Vicini, 2005). O método Ligação Completa agrupa os dados baseando-se na máxima distância entre os dados observados (Howaniec; Smolinski, 2017). A distância euclidiana média é um dos possíveis coeficientes de medida de distância que pode ser utilizado. A análise de agrupamento foi realizada utilizando-se o aplicativo SAEG versão 9.1 demo (UFV, 2007).

3. Resultados

Conforme dito anteriormente em um primeiro momento determinou-se os momentos fletores na direção x e y de cada elemento estrutural em função do método adotado. Para isso gerou-se o Tabela 16 apresentado logo abaixo:

[illegible]

	10	5,40	9,26	7,68	9,51	8,13	5,40	9,26	7,68	9,51	8,13
3 (4,00x4,00)	2	1,41	2,42	1,96	2,43	2,14	1,41	2,42	1,96	2,43	2,14
	4	2,82	4,84	3,91	4,87	4,27	2,82	4,84	3,91	4,87	4,27
	6	4,23	7,26	5,87	7,30	6,30	4,23	7,26	5,87	7,30	6,30
	8	5,64	9,68	7,83	9,74	8,43	5,64	9,68	7,83	9,74	8,43
	10	7,06	12,10	9,78	12,17	10,46	7,06	12,10	9,78	12,17	10,46
4 (4,50x4,50)	2	1,79	3,06	2,53	3,14	2,70	1,79	3,06	2,53	3,14	2,70
	4	3,57	6,12	5,05	6,27	5,29	3,57	6,12	5,05	6,27	5,29
	6	5,36	9,19	7,58	9,41	7,97	5,36	9,19	7,58	9,41	7,97
	8	7,14	12,25	10,10	12,55	11,31	7,14	12,25	10,10	12,55	11,31
	10	8,93	15,31	12,63	15,69	13,44	8,93	15,31	12,63	15,69	13,44
5 (4,00x3,00)	2	1,19	1,85	1,75	2,10	1,96	0,79	1,23	0,90	1,09	1,11
	4	2,39	3,71	3,49	4,21	3,81	1,58	2,46	1,80	2,18	2,22
	6	3,58	5,56	5,24	6,31	5,67	2,38	3,69	2,70	3,27	3,23
	8	4,77	7,41	6,98	8,42	7,52	3,17	4,92	3,59	4,36	4,34
	10	5,97	9,27	8,73	10,52	9,39	3,96	6,15	4,49	5,46	5,36
6 (5,00x3,00)	2	1,56	2,12	2,12	2,44	2,35	0,72	0,99	0,73	0,79	1,10
	4	3,11	4,24	4,24	4,88	4,58	1,45	1,97	1,46	1,58	2,11
	6	4,67	6,35	6,36	7,32	6,91	2,17	2,96	2,19	2,37	3,11
	8	6,22	8,47	8,48	9,77	9,17	2,89	3,94	2,92	3,16	4,12
	10	7,78	10,59	10,60	12,21	11,50	3,62	4,93	3,65	3,95	5,21
7 (6,00x3,00)	2	1,80	2,24	2,30	2,55	2,61	0,66	0,82	0,66	0,71	1,08
	4	3,60	4,48	4,60	5,09	5,10	1,31	1,63	1,32	1,42	2,09
	6	5,40	6,72	6,89	7,64	7,62	1,97	2,45	1,98	2,13	3,07
	8	7,20	8,96	9,19	10,18	10,11	2,62	3,26	2,64	2,84	4,07
	10	9,00	11,20	11,49	12,73	12,63	3,28	4,08	3,29	3,55	5,05

Tabela 16. Momentos fletores conforme laje, carregamento e maneira de cálculo

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que os valores obtidos através das tabelas sem a correção (T) costumaram destoar dos resultados encontrados pelos outros métodos. Além

disso, o método T não forneceu valores superiores aos demais métodos em nenhum caso dos valores apresentado no Tabela 16. Os resultados podem ser melhor visualizados por meio das Figuras (16 a 22).

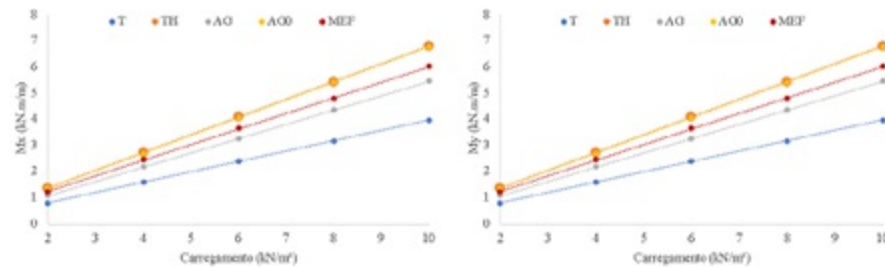


Figura 16. Momento em X e Momento em Y na Laje 1 (3,0 m x 3,0 m)

Fonte: Próprio autor.

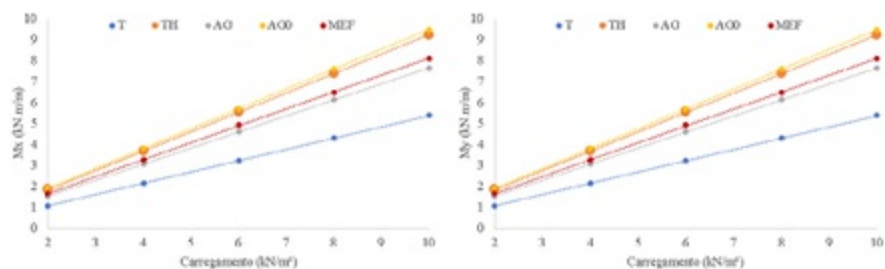


Figura 17. Momento em X e Momento em Y na Laje 2 (3,5 m x 3,5 m)

Fonte: Próprio autor.

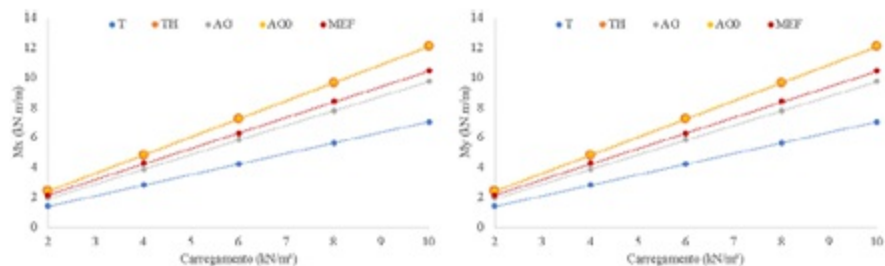


Figura 18. Momento em X e Momento em Y na Laje 3 (4,0 m x 4,0 m)

Fonte: Próprio autor.

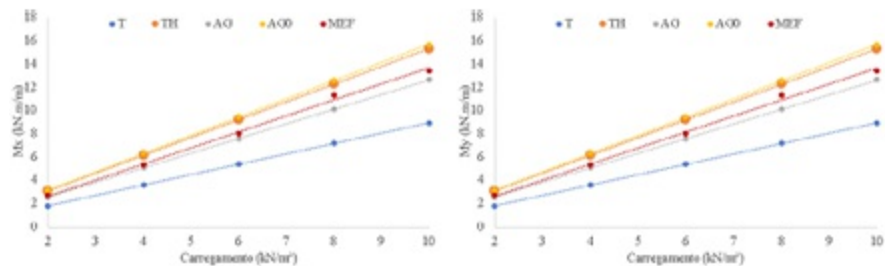


Figura 19. Momento em X e Momento em Y na Laje 4 (4,5 m x 4,5 m)

Fonte: Próprio autor.

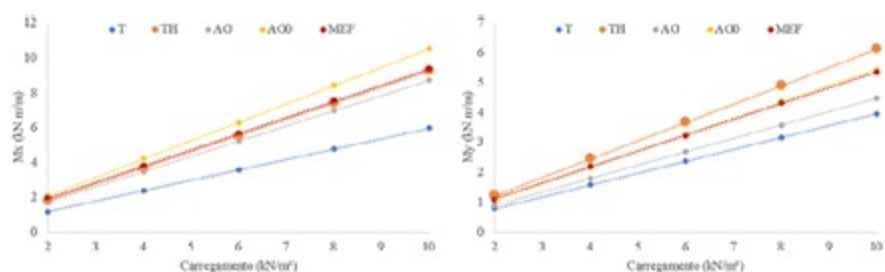


Figura 20. Momento em X e Momento em Y na Laje 5 (4,0 m x 3,0 m)

Fonte: Próprio autor.

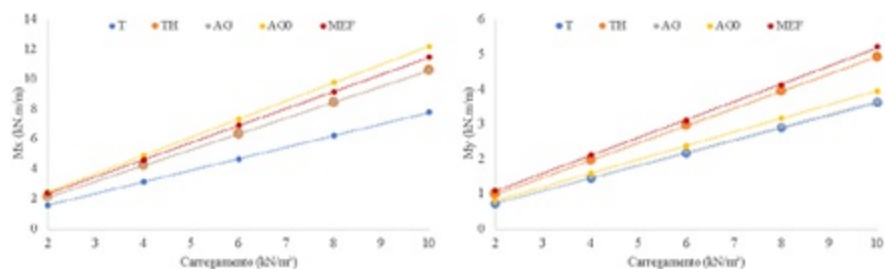


Figura 21. Momento em X e Momento em Y na Laje 6 (5,0 m x 3,0 m)

Fonte: Próprio autor.

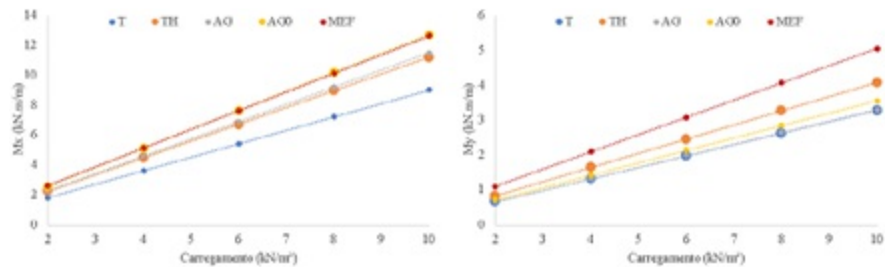


Figura 22. Momento em X e Momento em Y na Laje 7 (6,0 m x 3,0 m)

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos via tabelas sem correção (T) apresentaram-se, em geral, contrários à segurança. Já os resultados adquiridos via tabelas com correção (TH), de modo geral, conseguiram alcançar melhores aproximações com outras metodologias mais elaboradas, como a grelha e o MEF.

Quanto à Analogia de Grelha, é possível perceber que as grelhas sem rigidez à torção (AG0) sempre produzem resultados mais conservadores em comparação às grelhas com rigidez à torção (AG) e, portanto, são mais favoráveis à segurança.

Observa-se no Método dos Elementos Finitos (MEF) uma tendência de fornecer resultados intermediários às duas maneiras de cálculo da grelha (AG e AG0), isso para o caso das lajes quadradas. Para o caso das lajes retangulares, percebe-se que no caso de m_x , essa tendência em geral permanece, mas vai se enfraquecendo à medida que se aumenta a relação (λ) entre os lados da laje. Para o caso de m_y em lajes retangulares, essa tendência é levemente observada no caso de $\lambda=1,33$, mas vai some totalmente nos próximos λ simulados.

A fim de promover o agrupamento de valores criou-se o Tabela 17.

Laje (m x m)	Grupos	Momento em X	Momento em Y
1 (3,0 x 3,0)	1	T	T
	2	TH e AG0	TH e AG0
	3	AG e MEF	AG e MEF
2 (3,5 x 3,5)	1	T	T
	2	TH e AG0	TH e AG0
	3	AG e MEF	AG e MEF
3 (4,0 x 4,0)	1	T	T
	2	TH e AG0	TH e AG0

	3	AG e MEF	AG e MEF
4 (4,5, x 4,5)	1	T	T
	2	TH e AG0	TH e AG0
	3	AG e MEF	AG e MEF
5 (4,0 x 3,0)	1	T	T e AG
	2	AG0	TH e AG0
	3	TH, AG e MEF	MEF
6 (5,0 x 3,0)	1	T	T, AG e AG0
	2	TH e AG	TH e MEF
	3	AG0 e MEF	-
7 (6,0 x 3,0)	1	T	T, AG e AG0
	2	TH e AG	TH
	3	AG0 e MEF	MEF

Tabela 17. Grupos formados pela análise de agrupamento por Ligação Completa e distância Euclidiana Média para os momentos X e Y nas lajes analisadas em função do carregamento

Fonte: inserir fontes.

T – Tabela, TH – Tabela Hann, AG – Analogia de Grelha com rigidez à torção, AG0 – Analogia de Grelha sem rigidez à torção e MEF – Método dos Elementos Finitos.

Conclusão

Para o cálculo de lajes nervuradas bidirecionais é possível inferir que os resultados encontrados via tabelas devem ser sempre corrigidos a fim de apresentarem soluções mais favoráveis à segurança. Além disso, as soluções corrigidas apresentam resultados mais próximos dos outros métodos (grelha e MEF) quando comparadas às soluções sem correção. Além disso, as tabelas dispensaram o uso de microcomputadores e, por isso, podem ser muito úteis em situações práticas. As desvantagens do uso de tabelas é que os resultados obtidos são apenas os máximos, além disso, não se pode observar o

comportamento do pavimento como um todo e não é possível analisar, quando necessário, a estrutura considerando a flexibilidade dos apoios.

Os resultados obtidos via grelha se mostraram mais favoráveis à segurança quando foi desconsiderada a rigidez à torção dos elementos da grelha. Além disso, a utilização da grelha proporciona uma modelagem computacional relativamente simples, ao contrário do MEF, que demanda maior tempo na modelagem e no cálculo. O MEF apresenta a solução na forma de tensões, que torna a análise de dados mais complexa e demorada. A grelha pareceu ser mais adequada que o MEF no cálculo de lajes nervuradas bidirecionais, tanto por ter uma modelagem mais simples, quanto pela possibilidade mais acessível de liberar a torção nas nervuras (AG0), que costumou fornecer, de modo geral, resultados mais seguros que o MEF. Apesar disso, a escolha final é sempre do profissional, que deve ponderar muito bem qual metodologia se adéqua melhor ao seu problema.

Como propostas para futuras pesquisas, pode-se incluir o estudo de lajes nervuradas em formatos diferentes: circulares, em L e triangulares. Pode-se analisar os efeitos da plasticidade e a flexibilidade dos apoios nos resultados obtidos. Além disso, fazer simulações com lajes contínuas em vez de trabalhar apenas com lajes apoiadas.

Referências

- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. Volume 2. 4. ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2014. Disponível em: <<http://bit.ly/2QqitVX>>. Acesso em: 21 abr. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BARBIRATO, Carlos Braz C. **Contribuições à análise de pavimentos de edifícios em laje nervurada**. 1997. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <<http://bit.ly/2CRSSm7>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

- BARBOZA, Aline da S. R. **Contribuição à análise estrutural de sistemas lajes-vigas de concreto armado mediante analogia de grelha**. 1992. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <<http://bit.ly/2MysQE8>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- CARVALHO, Roberto C.; FIGUEIREDO FILHO, Jasson R. de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118: 2003. 3. ed. São Carlos: Edufscar, 2013.
- _____. PINHEIRO, Libânio M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: volume 2. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.
- HENNRICH, Carlos Alexandre. **Estudo sobre a modelagem de lajes planas de concreto armado**. 2003. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<http://bit.ly/2N7VLno>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- SORIANO, Humberto L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: Ed. da Edusp, 2003. Disponível em: <<http://bit.ly/2NdtrjG>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- STRAMANDINOLI, Juliana Sá B. **Contribuições à análise de lajes nervuradas por analogia de grelha**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<http://bit.ly/2QtFP1K>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- MARGARIDO, Aluizio Fontana. **Fundamentos de estruturas**: um programa para arquitetos e engenheiros que se iniciam no estudo das estruturas. 6. ed. São Paulo: Ziguarte, 2001.
- HOWANIEC, Natalia; SMOLINSKI, Adam. Biowaste utilization in the process of co-gasification with bituminous coal and lignite. **Energy**, n. 118, p. 18-23. 2017.
- UFV – Universidade Federal de Viçosa. **Sistema de análises estatísticas e genéticas (SAEG)**. Versão 9.1 Demo. Fundação Arthur Bernardes, Viçosa, MG. 2007.
- VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Monografia (Especialização em Estatística) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Notas

10. Graduado na Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, São Luís, Maranhão, Brasil. Contato: falecomleonardosales@gmail.com.
11. Universidade Federal de Goiás – UFG, Regional Catalão, Catalão, Goiás. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.
12. Universidade Paulista – Goiânia, Goiás, Brasil. Contato: charlesmyller@hotmail.com.
13. Universidade Federal de Goiás – UFG, Regional Catalão, Catalão, Goiás. Contato: antoverps@gmail.com.
14. Ji, Xuwrn ; CHEN, Sheng-Jin; et al. Deflection of waffle slabs under gravity and in-plane loads. In: SABNIS, Gajanan M. (ed.). *Deflections of concrete structures*. Detroit, ACI. p. 283-295. (ACI SP-66).
15. Hahn, Josef. *Vigas continuas, porticos, placas y vigas flotantes sobre lecho elastico*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, S.A., 1972.

Análise estrutural de barragens de rejeito considerando a ação sísmica

*Gabriel Gomes Silva*¹⁶

*Wellington Andrade da Silva*¹⁷

*Antonio Nilson Zamunér Filho*¹⁸

*Matheus Henrique Borges Coutinho*¹⁹

Resumo: A mineração é um dos pilares da sustentação econômica de um país, contribuindo diretamente para seu desenvolvimento, contando que suas atividades sejam realizadas com responsabilidade social e ambiental, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável. Porém, das atividades de mineração resultam a produção de elevadas quantidades de resíduos, que devem ser armazenadas de forma segura. Um destes resíduos é a fração de rejeito, provinda do processo de beneficiamento mineral e disposta em barragens de rejeito, as quais devem ser projetadas com foco em diversas diretrizes que garantam sua estabilidade. Um dos pontos de estudo deste trabalho é a análise estrutural das barragens quando solicitadas por ações sísmicas, visto que a sismicidade pode instabilizar os diques de contenção, reduzindo o fator de segurança a ponto de haver uma ruptura dos taludes, gerando impactos catastróficos, além de encargos econômicos como multas, indenizações, entre outros, podendo até levar a inviabilização das atividades mineiras.

Palavras-chave: barragens, sismicidade, estabilidade.

Introdução

Nas atividades de mineração, a extração e o processamento de minério resultam de elevadas quantidades de resíduos, os quais são definidos como a

fração estéril, provinda da exploração na mina e encaminhada para pilhas de estéril, e a fração de rejeitos, originada a partir da etapa de concentração e processamento mineral e encaminhada para armazenamento em barragens devidamente dimensionadas.

De acordo com Rezende (2013), a integridade das barragens de rejeito é de suma importância devido ao grande potencial contaminante do material contido nas mesmas.

Aliado ao enorme potencial contaminante, tem-se atualmente um aumento significativo no volume de rejeitos a serem estocados, devido a evolução de novas técnicas, tanto na lavra quanto no processamento mineral, as quais permitem um maior aproveitamento dos minérios, principalmente aqueles de baixo valor agregado. Nesse contexto, necessita-se de barragens de maiores dimensões, sendo fundamental que haja um planejamento das atividades de modo garantir o perfeito funcionamento destas obras, assegurando a continuidade das atividades mineiras com segurança e evitando possíveis impactos ambientais (Amorim, 2007).

Algumas falhas ocorridas em barragens de contenção de rejeitos custaram vidas e causaram danos ambientais consideráveis, resultando em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente (Duarte, 2008).

Na busca pela redução destes acidentes relacionados a estas estruturas de contenção, as barragens de rejeito devem ser projetadas com parâmetros mínimos de segurança que são normalmente aceitáveis para os cálculos de estabilidade de taludes. Os coeficientes de segurança obtidos e aceitos para os taludes, nas diversas fases do ciclo de vida do barramento, devem levar em conta a confiabilidade dos dados utilizados nas análises de estabilidade, a adequabilidade e as limitações das análises selecionadas, as magnitudes das deformações toleráveis e as consequências da ruptura em potencial.

Logo, suportar movimentos de fundação associados com o Sismo Máximo de Projeto (SMP), sem a perda da capacidade do reservatório de

serviço são características essenciais e obrigatórias para projetos e avaliações de barragens, e seu estudo deve ser realizado de maneira rigorosa e bem planejado. Este trabalho busca analisar a estabilidade de barragens quando sujeitas a ações sísmicas, que podem ser geradas de diversos modos, naturais e artificiais (como terremotos, induzidas por veículos, desmontes de rocha com explosivos, entre outros), e que impactará na diminuição do fator de segurança da mesma, podendo acarretar em uma instabilização e ruptura do dique, causando impactos ambientais, sociais e ainda causar perdas de vidas humanas.

1. Disposição de rejeitos na mineração

Existem inúmeras formas de disposição de rejeitos, as principais são a disposição em superfície (a céu aberto), em cavidades subterrâneas ou de forma subaquática, sendo que esta última não é comumente utilizada, principalmente por causa dos impactos ambientais a ela relacionados. Atualmente a busca por novas alternativas de disposição destes materiais vem sendo contínua e incessante, devido a diversos fatores, como os grandes volumes de rejeitos provindos do processamento mineral, a necessidade de recuperação de água, redução de impactos ambientais e grandes custos associados ao armazenamento (Figueiredo, 2007).

A forma mais utilizada para dispor rejeitos é a céu aberto, onde utiliza-se para construção do dique de partida materiais provindos de jazidas de empréstimo e também o próprio estéril e/ou rejeito gerados na mina e nas instalações de processamento. O alteamento das barragens pode assumir muitas configurações, cada uma com suas próprias características, requisitos, vantagens e riscos, sendo que estes alteamentos normalmente são realizados com o próprio rejeito, podendo ser por três métodos construtivos diferentes, o método a Montante, método a Jusante e método de Linha de Centro (Amorim, 2007; Figueiredo, 2007).

O método da montante é o mais antigo e econômico, sendo uma evolução natural do procedimento empírico de disposição de rejeito, como pode ser observada Figura 23. Este método de disposição, atualmente, apresenta uma série de restrições e exigências devido o número de acidentes relacionados ao mesmo (Amorim, 2007).

Para o método a montante, tem-se que o eixo da barragem se desloca para montante conforme esta vai sendo alteada. Devido o alteamento ser realizado sobre outra camada de rejeito inicialmente depositada (praia de disposição) tem-se que, com uma operação e monitoramento inadequados, a probabilidade de ocorrência problemas relacionados a susceptibilidade a liquefação e *piping* sejam maiores, o que atribui a este método um caráter de menor segurança com relação aos demais (Spitz; Trudinger, 2009).



Figura 23. Alteamento de uma barragem de rejeitos pelo método a Montante

Fonte: Albuquerque Filho, 2004.

Quanto ao método de jusante, tem-se que o eixo da barragem se desloca para jusante conforme ocorre seus alteamentos, fato este que permite que não haja alteamentos realizados sobre a praia de rejeitos, garantindo maior segurança ao barramento. Em contrapartida, tem-se que este método necessita volumes maiores de material para a sua construção, ocupando uma área final bem maior e tendo um custo atribuído mais alto com relação aos outros métodos (Amorim, 2007).

Uma alternativa entre os métodos já citados seria o método da linha de centro, o qual é uma variação do método da jusante. Neste, tem-se que o eixo da barragem desloca-se verticalmente com relação a execução dos

alteamentos. Este método apresenta custos intermediários e necessita de volumes menores, sendo uma alternativa bastante flexível quando comparado ao método a jusante, porém mais dispensioso que o método a montante (Amorim, 2007).

2. Características dos sismos

Segundo Lima (2008), inúmeras são as aplicações da dinâmica em projetos de estruturas no ramo das engenharias, principalmente devido as forças sísmicas estarem entre as mais destrutivas forças da natureza, e potencialmente representarem um grande risco de danos materiais e de perdas de vidas humanas. Com a tecnologia disponível, a previsão da ocorrência e grandeza de um sismo em um determinado local, só pode ser feita em termos probabilísticos. O que se busca é, a partir dos registros de sismos passados se obter informações do ponto de vista de engenharia, para que as construções tenham, no futuro, um risco de colapso dentro de um nível de probabilidade considerado como aceitável pela sociedade.

Segundo Loayza (2009), a intensidade de um sismo é um parâmetro de medida qualitativa que classifica a severidade do movimento do solo, provocado por um sismo numa determinada área, com base nos efeitos experimentados por pessoas e observados em objetos, estruturas e na natureza. É, portanto, um parâmetro subjetivo, pois depende da impressão do observador. A magnitude é uma medida quantitativa relacionada com a energia liberada pelo sismo, sendo calculada em função da máxima amplitude dos deslocamentos registrados em estações sismográficas.

De acordo com Assumpção (2000), o tamanho relativo dos sismos é denominado de magnitude. Pode-se mensurá-la usando a Escala Richter, criada em 1935, pelo sismólogo estadunidense Charles Richter. A medida da escala é logarítmica, ou seja, apresenta intervalos de diferença na amplitude das vibrações de dez vezes. Assim, um tremor de magnitude na Escala

Richter de 5 tem vibrações dez vezes menores que um tremor de magnitude 6 e cem vezes menores que um cuja magnitude é 7.

Sismos com magnitude menor que 5 geralmente causam danos de pouca significância, já os de magnitude maior do que 5 são potencialmente muito destrutivos. A profundidade do hipocentro²⁰ também é um fator que afeta os efeitos destrutivos de um sismo. O Quadro 1 apresenta uma análise da ocorrência de terremotos no Brasil com magnitude superior a 5 entre 1955 e 2005.

Data	Hora	Local	Magnitude (escala Richter)
21/01/1955	02:03:07	Serra Tombador - MT	6,6
28/02/1955	22:46:18	Litoral Vitória - ES	6,3
13/12/1963	21:05:42	Manaus - AM	5,1
13/02/1964	08:21:46	NW Mato Grosso do Sul	5,4
20/11/1980	00:29:42	Paracajus - CE	5,2
05/08/1983	03:21:42	Codajás - AM	5,5

Tabela 18. Terremotos no Brasil com magnitude superior a 5 entre 1922 e 2005

Fonte: Loayza, 2009.

De acordo com a NBR 15421, para estabelecer os procedimentos a serem adotados na análise sísmica de uma estrutura, inclusive as cargas sísmicas de projetos, é preciso considerar a zona sísmica onde a estrutura está situada, as características do terreno de fundação, o tipo de ocupação, o sistema estrutural, a regularidade e ductilidade da estrutura, entre outros aspectos, os quais são apresentados mais detalhadamente na norma em questão.

Cinco zonas sísmicas são definidas no Tabela 19. A Figura 24 também define as mesmas 5 zonas, porém, considerando a variação de a_g , aceleração sísmica horizontal máxima padronizada para terrenos da Classe B (“Rocha”, conforme definido na Norma NBR 15421).

Zona sísmica	Valores de a_g
Zona 0	$a_g = 0,025g$
Zona 1	$0,025g \leq a_g \leq 0,05g$
Zona 2	$0,05g \leq a_g \leq 0,10g$
Zona 3	$0,10g \leq a_g \leq 0,15g$
Zona 4	$a_g \leq 0,15g$

Tabela 19. Definição das zonas sísmicas

Fonte: Lima, 2008.

Observe-se que a Figura 24 reflete a baixa sismicidade do território brasileiro, que apresenta, na maior parte de seu território, valores de a_g inferiores a 0,025g.

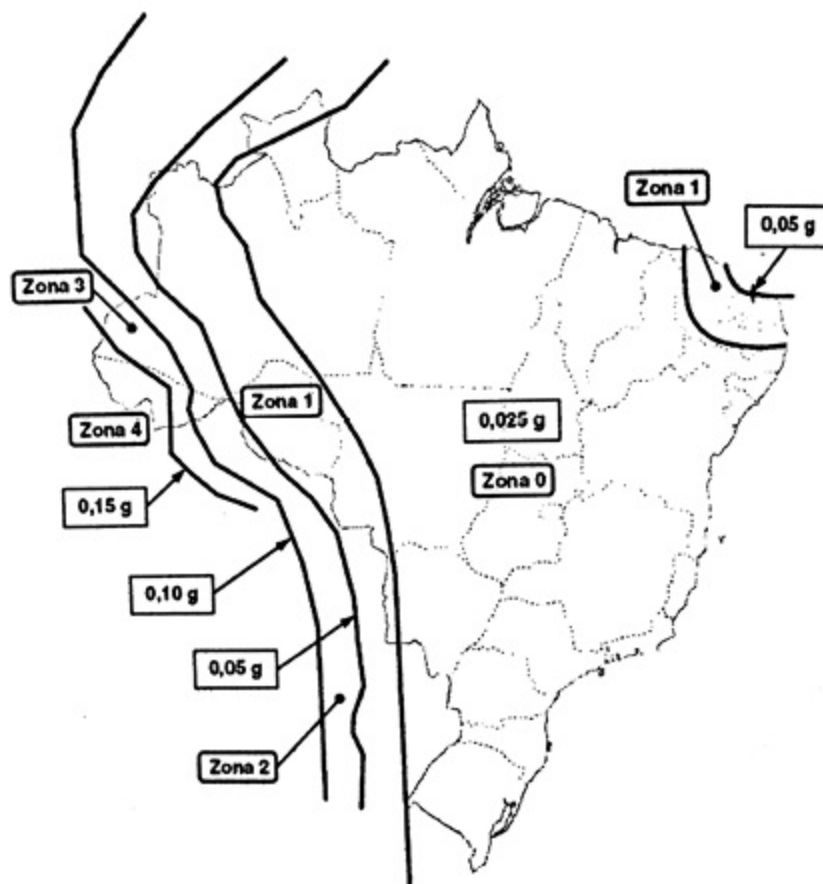


Figura 24. Mapeamento da aceleração sísmica horizontal carecterística no Brasil para terrenos da Classe B (“Rocha”)

Fonte: Lima, 2008.

3. Influência das ações sísmicas na estabilidade das barragens

Em um plano diretor de barragens de rejeitos, uma investigação de problemas envolvendo carregamentos sísmicos é fundamental, devendo o engenheiro geotécnico conhecer os diferentes processos de geração, ocorrência e influência dos sismos nos prováveis modos de ruptura que uma barragem pode apresentar, garantindo sua estabilidade diante carregamentos extremos, como o Sismo Máximo de Projeto (SMP), que, de acordo com o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002), é normalmente representado pela movimentação mais severa da fundação que foi selecionada para a implantação do projeto ou para a avaliação de segurança da barragem.

Vários podem ser os danos apresentados em estruturas devidos aos tipos de ondas induzidas por eventos sísmicos, porém, segundo Loayza (2009), os danos observados em geo-estruturas devido a ação destes carregamentos dinâmicos não ocorrem necessariamente durante o evento. Têm-se observado em campo que muitos danos acontecem após o término da excitação. Entre fatores que contribuem para este comportamento, podem ser mencionadas a geração e posterior redistribuição dos excessos de poropressão, a ação de fenômenos erosivos (*piping*) em fissuras criadas pelo sismo e, principalmente, a perda de resistência do solo sob ação do carregamento dinâmico (liquefação).

O evento da liquefação ocorre no caso de depósitos, de baixa compacidade *in situ*, em condições saturadas, que são solicitados por um esforço abrupto suficientemente capaz de gerar uma situação não drenada, aumentando as poropressões no ambiente a valores tais que a tensão efetiva do material decaia consideravelmente, causando uma diminuição expressiva da sua resistência ao cisalhamento (Penna, 2010).

Em geo-estruturas localizadas em zonas de atividade sísmica (natural ou artificial), a consideração de análises pós-sismo, como a estabilidade de taludes de barragens, são considerações importantes de projeto, sendo os parâmetros de movimentação específicos do local, necessários para o projeto ou avaliação, são determinados a partir do SMP.

4. Metodologia

4.1 Métodos de Cálculo de Estabilidade Estrutural

A resposta dinâmica em estruturas sujeitas a ações sísmicas é bastante complexa, sendo que as tensões e deformações resultantes destas ações dependem de inúmeros fatores, como a resposta do solo presente na fundação, a resposta do maciço suportado, da massa e da rigidez da estrutura e, da própria natureza das ações sísmicas. Assim, devido a complexidade destes fenômenos e sua interligação, bem como a dificuldade associada na determinação das propriedades dos solos, que pode gerar certas incertezas, os métodos de cálculo disponíveis para a obtenção da resposta dinâmica deste tipo de estruturas utilizam metodologias simplificadas, nas quais estas várias simplificações são introduzidas ao nível das propriedades dos solos e da estrutura e também na avaliação das solicitações sísmicas atuantes.

Segundo Cruz (2014), de modo a prever o comportamento sísmico da barragem pode-se utilizar de vários métodos de cálculo, o mais utilizado para modelagem e análise destas estruturas são métodos dinâmicos, que podem ser realizados com método dos elementos finitos, a fim de se obter resultados mais aproximados, envolvendo porém maior custo operacional. Os métodos estáticos são métodos simplificados de dimensionamento sísmico, cuja aplicação visa a determinação de coeficientes de segurança para os vários mecanismos de ruptura que poderão ocorrer.

Análises que envolvem o cálculo do fator de segurança de estruturas sujeitas a sismos pode ser feita recorrendo-se a soluções de equilíbrio limite,

onde tem-se que as forças de um esforço sísmico são representadas basicamente por componentes verticais e horizontais (coeficientes sísmicos) e, a massa de solo potencialmente instável é multiplicada por este coeficiente (FIORI, 2016).

A análise estrutural da barragem sujeita a ação sísmica tem por objetivo investigar a resposta da estrutura e da fundação quando sujeita a carregamentos dinâmicos, analisando a possibilidade de geração de excessos de poropressões em determinadas áreas, o que poderia levar ao efeito de um processo de liquefação, causando danos inerentes de uma provável ruptura da barragem.

4.2 Modelagem da Barragem na condição estática e dinâmica

O presente trabalho apresenta uma análise dinâmica do comportamento estrutural de uma barragem de rejeitos com alteamento realizado a montante, de modo a demonstrar que mesmo barragens com esta metodologia de construção, caso bem projetadas e com constante monitoramento, podem ser viáveis no Brasil.

O modelo, adaptado de Loayza (2009), apresenta simplificações geométricas estruturais, a fim de se adaptar as funcionalidades do software utilizado, sendo que estas foram realizadas de modo a não alterar de maneira significativa as condições da barragem, assim como apresentado na Figura 25.

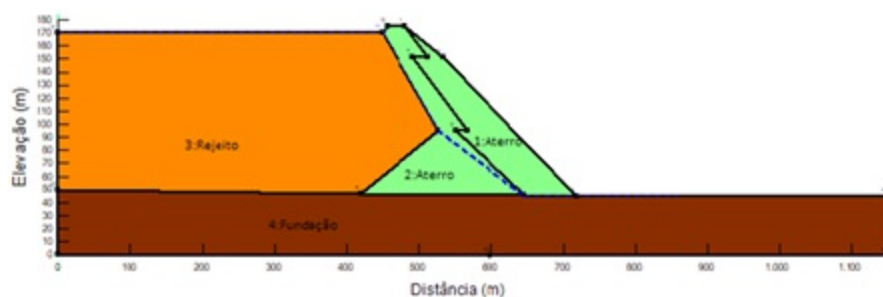


Figura 25. Modelo geometrico da barragem de rejeitos alteada a montante

Fonte: Próprio autor.

O depósito de rejeitos apresenta uma altura de 130 metros a partir da fundação. Considerou-se uma fundação composta por material aluvionar, o rejeito depositado a montante da barragem sendo composto de uma mistura de material argiloso, areia fina e silte, e para o enrocamento considerou-se um colúvio siltoso.

O comportamento da barragem foi simulado sob ação de carregamentos dinâmicos, segundo as zonas sísmicas 2 e 3, presentes no território Brasileiro, onde adotou-se uma aceleração sísmica horizontal de 0,1g. Considerou-se também valores aproximados para as propriedades dos materiais da barragem, Tabela 20.

Propriedade do material	Fundação	Enrocamento	Rejeito
Peso específico (KN/m ³)	19,000	20,000	16,000
Ângulo de atrito (°)	37	37	32
Coeficiente de Poisson	0,200	0,175	0,300
Condutividade hidráulica (m/s)	5,00E-05	8,60E-06	3,68E-07
Índice de vazios	0,6	0,575	0,8
Porosidade	0,375	0,344	0,444
Considerações para todos os materiais			
- Módulo de Cisalhamento Estático (Gmax) = 5000 Kpa			
- Coeficiente de amortecimento = 0,1 (10%)			
- Coesão considerada nula (análise de situação crítica)			

Tabela 20. Propriedades dos materiais

Fonte: Adaptação de Loayza, 2009.

Fez-se uma análise estática inicialmente através de um software específico para abordagens de problemas geotécnicos, considerou-se neste

um modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb para todos os materiais, analisando os dados a partir do modelo teórico de Morgenstern-Price, considerando uma função meio-seno sob atuação de uma linha freática (linha piezométrica), a qual se inicia acima dos rejeitos e segue um caminho preferencial pelo dreno interno no enrocamento da barragem até a fundação (Figura 25).

Devido as sismicidades na maior parte do território brasileiro ser baixa, foram considerados nos cálculos dinâmicos uma hipótese de que a barragem estaria sujeita a um sismo de 0,1g que atuou por 10 segundos, ou seja, valores acima dos usualmente observados. Os valores da magnitude foram obtidos a partir de registros históricos de acelerações horizontais (Figura 26).

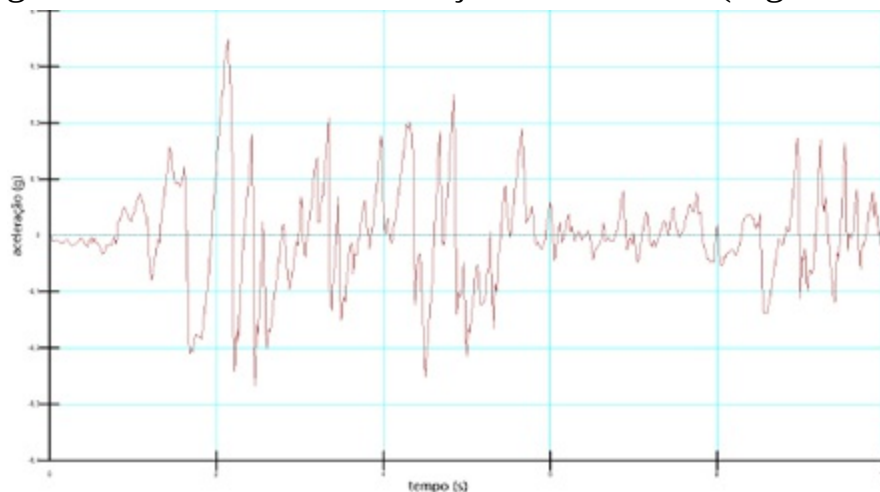


Figura 26. Registro de aceleração horizontal de 0,1g atuando por 10 segundos

Fonte: Próprio autor.

Para análise dinâmica, fez-se um modelo para o estado de tensões *in situ*, ou seja, antes da ocorrência do evento sísmico, e, um modelo para a condição pós sismo, considerando a aceleração horizontal de 0,1g. Utilizou-se da análise linear elástica para modelamento das propriedades dos materiais.

A Figura 27 apresenta as condições dinâmicas de contorno utilizadas.

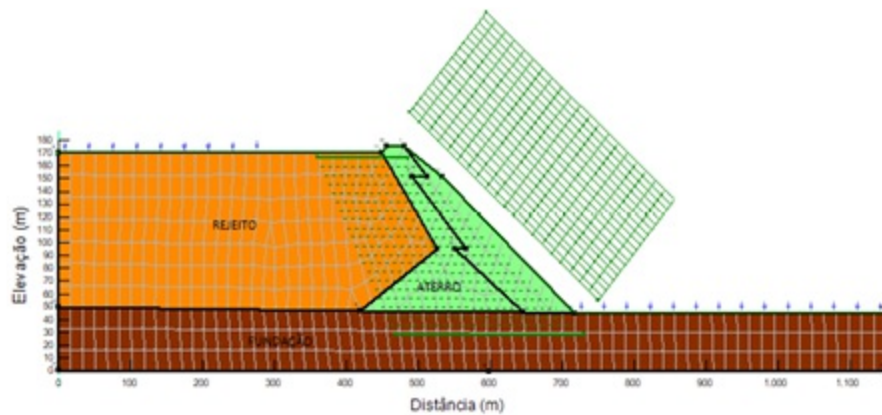


Figura 27. Condições de contorno para análise dinâmica

Fonte: Próprio autor.

5. Resultados

Definindo-se a superfície de deslizamento potencial a partir de um círculo de ruptura centrado em um *grid* pôde-se obter os resultados representados na Figura 28, onde se percebe um Fator de Segurança mínimo, $FS = 1,314$ na face do talude a jusante, variando para valores de acima de 1,5 próximo a crista da barragem, que tendem a aumentar conforme se considere curvas de ruptura iniciando na bacia de rejeitos.

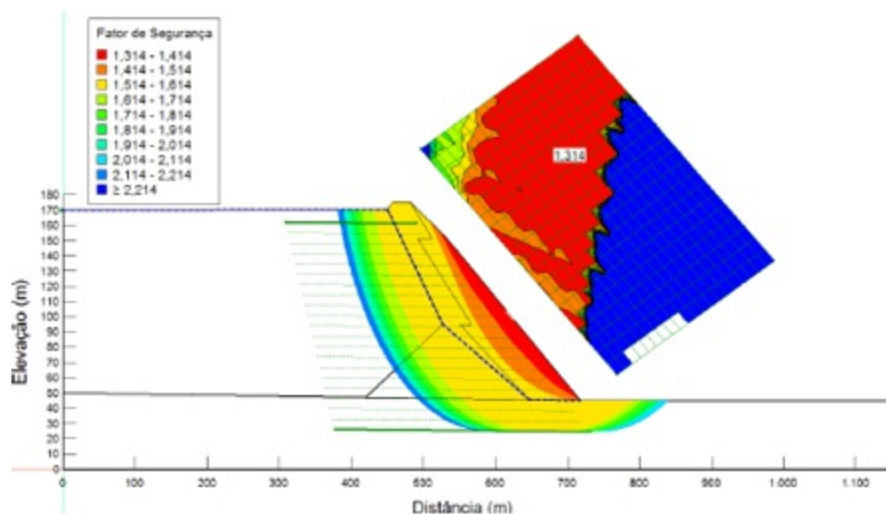
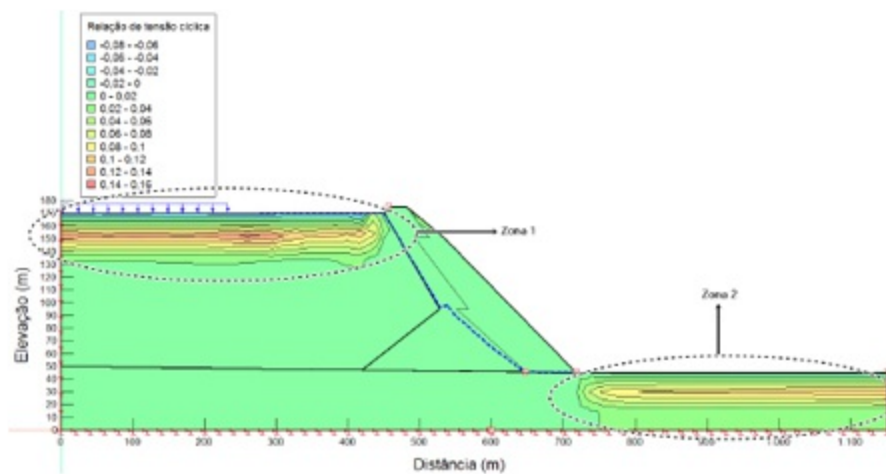


Figura 28. Fator de segurança pelo método de Morgenstern Price

Fonte: Próprio autor.

Para a análise estrutural da barragem sujeita a ação sísmica, buscou-se investigar: a possibilidade de geração de excessos de poropressões em determinadas áreas (liquefação); possibilidade de amplificação da aceleração horizontal em pontos estratégicos da barragem; deslocamento horizontal e vertical; estabilidade dos taludes e fator de segurança pós-sismo.

O primeiro passo foi a análise dos resultados da razão de tensão cíclica (CSR), a qual está relacionada diretamente com a possibilidade de liquefação. Em geral, quanto maior o CSR, maior a possibilidade de liquefação. Considerou-se apenas possibilidade de ocorrência de liquefação na bacia de rejeitos e na fundação, pois são materiais com alta possibilidade de saturação. De acordo com a Figura 29, percebem-se duas zonas susceptíveis a aumento de poropressões devido ao abalo sísmico, zona 1 na bacia de rejeitos e zona 2 na base a jusante da fundação, com valores máximos de CSR abaixo de 0,2. Percebe-se que apenas na zona 1 tem-se a possibilidade de ocorrência de liquefação, porém esta é baixa devido aos baixos valores de CSR.



a)

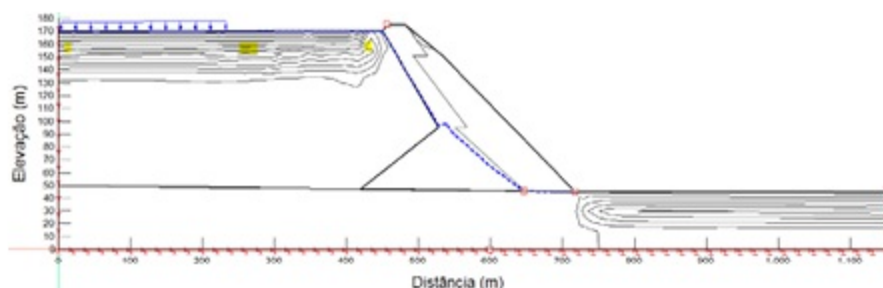


Figura 29. Razão de tensão cíclica (CSR) para as duas zonas (Figura a); zona com possibilidade de liquefação em amarelo (Figura b)

Fonte: Próprio autor.

Assim como apresentado na Figura 30 fez-se mensuração de pontos de registro histórico de sismicidade na crista (1), junto ao dreno central na base da fundação (2), no pé da barragem (3) e no fundo da fundação (4), buscando analisar acelerações e deslocamentos sísmicos, nos eixos horizontais e verticais do problema. Os valores do fundo da fundação são uma replicação dos valores de entrada; isto é, o registo de entrada sísmo (com pico em 0,1g). Percebe-se pelos gráficos que as acelerações horizontais de pico não ultrapassam valores de 0,02g indicando que não há nenhuma amplificação no movimento em nenhum ponto.

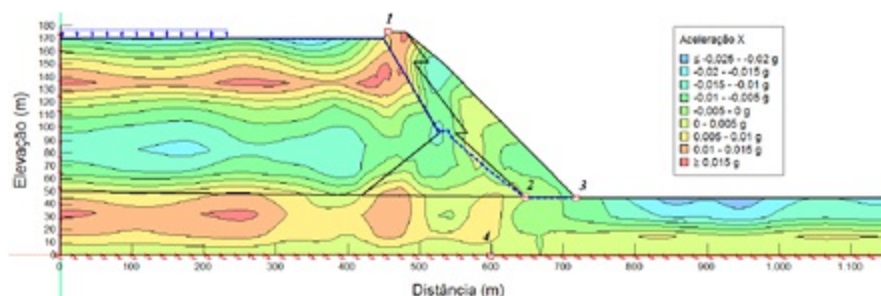


Figura 30. Aceleração horizontal referente ao sismo de 0,1g

Fonte: Próprio autor.

Analisando o Fator de Segurança na situação pós-sismo, definiu-se um mapa de segurança de acordo com as curvas de ruptura, onde a partir dos resultados, percebe-se uma diminuição dos valores do Fator de Segurança

quando comparado com a análise estática, variando de 0,986 (FS mínimo encontrado) na face à jusante do talude da barragem até valores de 1,486 próximos à crista do talude a montante da barragem. Isto implica que, sujeita a acelerações desta magnitude, prováveis rupturas locais de pequena extensão na face à jusante poderão ocorrer, porém não irão influir em uma ruptura generalizada da barragem. Os resultados podem ser observados na Figura 31.

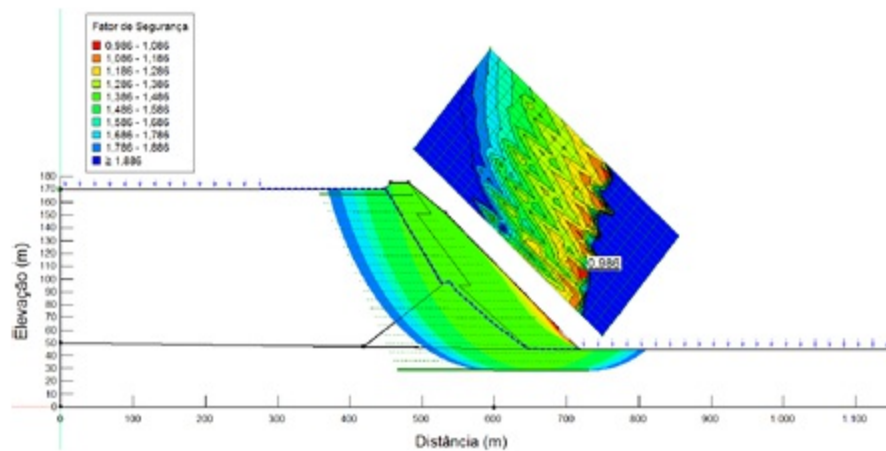


Figura 31. Fator de segurança pós-sismo

Fonte: Próprio autor.

Após os 10 segundos de sismo, toda a estrutura da barragem apresentou deslocamentos e deformações, porém de baixa extensão. Os mesmos podem ser analisados no Tabela 21 junto aos outros valores de parâmetros observados.

Parâmetros	Análise dinâmica	Análise
Razão de Tensão Cíclica (CSR)	-0,008 à 0,16	-
Deslocamento Horizontal	0,040m à 0,110m	-
Deslocamento Vertical	-0,020m à 0,018m	-
Aceleração Horizontal	-0,025g à 0,020g	-
Fator de Segurança Mínimo	0,986	1,314

Tabela 21. Resultados para o modelo em função de diversos parâmetros

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se, a partir dos resultados apresentados, que o Fator de segurança após a ocorrência dos sismos, considerando a linha de ruptura na face à jusante da barragem (F.S. = 0,986), apresenta valores bem abaixo do valor apresentado em uma análise estática (1,347), como $F.S. \leq 1$, uma provável ruptura irá ocorrer, porém, estas rupturas são de pequenas extensões e são na face do talude, o que não influenciará em uma ruptura generalizada da barragem;

Observa-se também que mesmo após a ocorrência do sismo, não houveram muitas alterações no coeficiente de segurança da barragem quando considerada uma linha de ruptura passando pela bacia de rejeitos, ou seja, a barragem apresenta condições seguras de operação.

Analisando as variações nos deslocamentos horizontais e verticais, têm-se que estas são ínfimas, além disso, não houveram amplificações nas acelerações horizontais de maneira significativa no modelo analisado, assim, com devido monitoramento a barragem continuará estável.

Considerações finais

O trabalho buscou apresentar uma perspectiva sobre a segurança de barragens de rejeito no território brasileira caso houvesse algum carregamento dinâmico aplicado a estas estruturas, considerando um valor para aceleração horizontal da gravidade de 0,1g. De acordo com os resultados apresentados pelo estudo de caso, a segurança de uma barragem de rejeitos vai sofrer uma grande alteração quando se analisa uma situação pós-sismo, porém, para o caso específico apresentado, o fator de segurança ainda permaneceu com valores aceitáveis. Assim, percebe-se que estruturas de grande porte, mesmo quando alteadas pelo método a montante, podem apresentar seguras e viáveis para serem utilizadas, porém deve-se ter

cuidados sistematicos quanto ao monitoramento da estrutura de modo a evitar futuros danos.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421:** Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento. 2006.
- ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone.** 2004. 215 f. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- AMORIM, Enio Fernandes. **Efeitos do Processo de Deposição no Comportamento de Rejeitos da Mineração de Ouro.** 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília.
- ARAÚJO, Cecília Bhering. **Contribuição ao Estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de Ferro.** 2006. 143 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ASSUMPÇÃO, Marcelo; et al. Sismicidade e estrutura interna da Terra. In: TEIXEIRA, Wilson; et al. (org.). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000, p. 47-50.
- CRUZ, Paulo T.; et al. **Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no Estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- FIGUEIREDO, Marcelo Marques. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG.** 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- FIORI, Aalberto Pio. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- LIMA, Silvio S.; SANTOS, Sergio Hampshire de C. **Análise dinâmica das estruturas.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2008, p. 125- 137.

- LOAYZA, Fanny Herrera. **Modelagem do comportamento pós-sismo de uma barragem de rejeito**. 2009. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MANUAL de segurança e inspeção de barragens. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infraestrutura Hídrica, Brasília, 2002.
- PENNA, Lorena Romã; et al. **Liquefação Estática em Depósitos de Rejeitos de Mineração**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade, Gramado, 2010.
- REZENDE, Diego Alvez D. **Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos**. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SPITZ, Karlheinz; TRUDINGER, John. **Mining and the Environment: From Ore to Metal**. P.O. Box 447, 2300 AK Leiden, The Netherlands, 2009.
- TUTORIAL of Quake/W. **Dynamic Modeling with Quake/W**. An Engineering Methodology. Geo-Slope International Ltda, 2014.

Notas

16. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: gabriel_gomes@ufg.br.
17. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: wellington.andrade@gmail.com.
18. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: antoniozamuner@ufg.br.
19. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: matheushbcoutinho@gmail.com.
20. O ponto onde o sismo se origina é chamado de *hipocentro* ou *foco*, e geralmente fica em camadas profundas da crosta terrestre. O ponto na superfície da Terra diretamente acima do hipocentro é chamado de *epicentro*.

Rastreamento de objetos em vídeo usando mistura de gaussianas e filtro de kalman: mapeamento da literatura

Karla Melissa dos Santos Leandro²¹

Iago Ferreira Lima²²

Sérgio Francisco da Silva²³

Marcos Napoleão Rabelo²⁴

Resumo: Este trabalho apresenta uma revisão da literatura acerca do método de rastreamento envolvendo objetos em vídeos em câmera estática, para este fim utilizou-se subtração de plano de fundo, afim de detectar o objeto em vídeo, com o uso de duas ferramentas distintas: Mistura de Gaussianas e Filtro de Kalman. O objetivo principal do trabalho é levantar dados acerca da especificidade das pesquisas desenvolvidas, identificar razões de possíveis quedas ou progressões a respeito do tema em diversos anos. Para isso ser possível, foi elaborado um *Systematic Mapping Study* (SMS) para distinguir os dois métodos acoplados. Para a escolha das palavras chaves, foi atribuído a expressão “Detecção de objetos”, pela variedade de áreas e temas ligados ao Filtro de Kalman. De posse das palavras expressões-chave, foram realizadas pesquisas nas bases de dados Periódicos Capes, Scopus e Science Direct, para analisar o grau de disseminação do tema em diferentes bases de dados.

Palavras-chave: Subtração de fundo, Filtro de Kalman, Visão computacional, Misturas Gaussianas.

Introdução

A detecção e o rastreamento de objetos em vídeos são tarefas primordiais para muitos sistemas visão computacional, tais como veículos autônomos (Petrovskaya; S.Thrun, 2009), reconhecimento de atividades (Choi; Savarese,2012), em sistemas de monitoramento de tráfego (Kiratiratanapruk; Siddhichai, 2006), interação humano computador (Jacob; Karn, 2003), e indexação de vídeo (Courtney, 1997). Contudo, para muitas aplicações, o processo de detecção e rastreamento de tráfego não é trivial devido a fatores como ruídos, baixa resolução de câmera, mudanças de iluminação na cena, oclusão parcial ou total de objetos, entre outros. Assim, é de extrema importância a elaboração de métodos de detecção e rastreamento robustos a tais fenômenos (Yilmaz; Javed; Shah, 2006).

Nos últimos anos, o congestionamento no trânsito tornou-se um problema significativo. Soluções contemporâneas dão maior enfoque ao controle das informações vindas dos sistemas de vigilância. Desta forma, a detecção de veículos é uma abordagem promissora (Coifman et al., 1998). Neste contexto, dados estatísticos do sistema de detecção são utilizados para controlar o fluxo do trânsito.

Com isso, informações adicionais das trajetórias dos veículos, são cada vez mais relevantes, a partir delas, é possível identificar manobras perigosas, mudanças repentinas de faixas, padrões de aceleração e desaceleração (Gupte et al., 2002). Os sistemas de rastreamentos podem produzir dados individuais de cada objeto, por exemplo, a qual distância está um veículo do outro? e a qual velocidade? e desta forma, podemos compreender melhor o comportamento do condutor.

Esse trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a detecção de objetos utilizando Filtro de Kalman e Mistura de Gaussianas, caracterizar a progressão de desenvolvimento de algoritmos de detecção de objetos e identificar principais aplicações. Com essas finalidades, foi desenvolvido um mapeamento sistemático da literatura (SMS), conforme

proposto por (Kitchenham, 2010). Além de contribuir na identificação de possíveis lacunas e participar do acervo de matérias para pesquisas futuras.

1. Metodologia

Esse trabalho foi elaborado a partir de uma revisão da literatura nas bases de dados Scopus, Science Direct e Periódicos Capes, no período entre 2003 e 2016, foram escolhidas estas bases de dados, devido as mesmas serem bases de dados centralizadas de resumos, artigos e citações para jornais e revistas acadêmicas. As palavras-chave utilizadas foram “Detecção de Objetos, Filtro de Kalman e visão Computacional” e “Detecção de Objetos, Mistura de Gaussiana e visão Computacional” e “Detecção de Objetos, Filtro de Kalman e Mistura de Gaussianas” e suas correspondentes em inglês, “Kalman Filter and Object Detection and Computer vision” e “Gaussian Mixture and Object Detection and Computer vision” e “Object Detection and Kalman Filter and Gaussian Mixture”.

As expressões chaves foram agrupadas de acordo os temas de interesse. O termo “Visão Computacional” foi empregado as expressões a fim de filtrar as teorias e tecnologias na construção dos sistemas. Na Tabela 22 podemos ver como as expressões foram separadas.

Grupo 1	Kalman Filter and Object Detection and “Computer vision”
Grupo 2	Gaussian Mixture and Object Detection and “Computer vision”
Grupo 3	Object Detection and Kalman Filter and “Gaussian Mixture”

Tabela 22. Expressões chaves e seus respectivos grupos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Somando-se todas as bases de dados, e separando por Grupos, foram encontrados 1.111 artigos referente ao Grupo 1, referente ao Grupo 2, 978 artigos e 342 artigos referente ao grupo 3. Na Tabela 23 podemos confortar

todos os artigos de um mesmo grupo, reunir todas as Bases de Dados e retirar os artigos repetidos, desse modo foram selecionados 36 artigos do Grupo 1, 22 artigos do Grupo 2 e 48 artigos do Grupo 3. Na Seleção final foram selecionados 25 Artigos do Grupo 1 que obtiveram resumos aderente, 19 do Grupo 2 e 30 do Grupo 3.

Expressões						
Base de Dados	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	Número de Artigos Publicados					
	Inicial	com título aderente	inicial	com título aderente	inicial	com título aderente
Scopus	122	30	167	35	47	16
Science Direct	971	47	784	33	293	62
Periódicos Capes	18	5	27	14	2	0
Total	1.111	85	978	82	342	78
Artigos sem repetições entre as bases de dados	36		22		48	
Artigos selecionados após leitura do título e resumo	25		19		30	

Tabela 23. Resultados obtidos nas pesquisas nas bases de dados selecionados

Fonte: Elaborado pelos autores.

2. Trabalhos correlatos

Métodos de detecção de veículos baseados em visão computacional são utilizados no trabalho de Chen, Ellis e Velastin (2016) a fim de realizar a classificação de objetos em tráfego de uma câmera estática de um circuito fechado de uma estrada. Os veículos são detectados usando subtração de fundo com base em um modelo de Mistura Gaussiana, esse método pode lidar

com detecção de veículos que se tornam estacionários durante um período de tempo significativo e após um período de tempo se movem rapidamente.

A extração da geometria da estrada e o comportamento do movimento do veículo são dados importantes para a interpretação semântica dos padrões de fluxo de tráfego, como componente de um sistema de vigilância de tráfego baseado em visão inteligente (Chen; Yan; Ellis, 2014). O veículo é rastreado pelo filtro Kalman usando uma característica de marcações que estão próximos a superfície da estrada. A linha central de cada pista de tráfego é calculada agrupando várias trajetórias.

Para detectar violações de regras típicas em terminais de trânsito público através do movimento de pessoas, Dalka e Bratoszewski (2013) utilizaram processamento de imagens baseando-se na detecção de objetos com modelos de Mistura de Gaussianas e empregando filtros de Kalman com extensões a fim de rastrear objetos. De modo a permitir um reconhecimento efetivo de eventos num ambiente lotado, o algoritmo para detecção de eventos é criado com a análise baseada em fluxo óptico de modo a obter características de velocidade em nível de pixel.

Para situações de tráfego humano de alta densidade, Jia, Li e Li (2016) propuseram um método no qual a transformação das coordenadas dos centroide e a cor são usadas como características para detectar, rastrear e contar os alvos móveis. Os resultados experimentais mostram que o método proposto pode resolver o problema da contagem dos alvos móveis das sequências de vídeo no caso de tráfico humano de alta densidade.

Com a finalidade de acompanhar múltiplos movimentos em cenas dinâmicas e complexas, Fakharian, Hosseini e Gustafsson (2011) propuseram um algoritmo que consiste em duas etapas: no primeiro, detecção da pessoa propriamente dita. Em seguida, utilizar o modelo de Mistura Gaussiana com taxa de adaptação variada para melhorar o desempenho da detecção humana.

A abordagem proposta por Hu, Qu, Li e Wang (2014) é validada em cenas de tráfego real. Múltiplos alvos móveis são rastreados através da integração das características de movimento e forma pelo modelo de filtro Kalman. Para garantir a continuidade e a estabilização, é realizado o processamento de oclusão.

Com o intuito de monitorar o local que precisa de segurança constante, tais como bancos, shoppings, rodovias, lugares públicos lotados Kamaraj e Balakrishnan (2015) desenvolveram um sistema visual de detecção e rastreamento de objetos em movimento. O método de Mistura de Gaussianas é proposto neste trabalho para integrar a adaptação de melhor plano de fundo na detecção. Utilizou-se também o Filtro de Kalman para minimizar o custo de observação de rastreamento.

O problema do rastreio de múltiplos objetos pode ser dividido em duas partes; detectando objetos em movimento em cada quadro e associando as detecções correspondentes ao mesmo objeto ao longo do tempo. A detecção de objetos em movimento usa um algoritmo de subtração de fundo baseado em modelos de Mistura Gaussiana. O movimento de cada faixa é estimado por um filtro de Kalman (Krerngkamjornkit; Simic, 2014).

Os dados sobre volumes de pedestres e bicicletas são necessários para planejamento de transporte, projeto de infraestrutura e gerenciamento de tráfego. O modelo de Mistura Gaussiana foi usado para extrair objetos em movimento de uma sequência de imagens. No módulo de rastreamento, a parte mais desafiadora deste sistema, as trajetórias, foram obtidas pelo uso de um filtro de Kalman. Para identificação de pedestres e bicicletas, utilizou-se uma rede neural de retro propagação no módulo de classificação (Li et al., 2010).

O rastreamento humano em cenas dinâmicas tem sido um importante tópico de pesquisa Mirabi e Javadi (2012) propuseram uma abordagem para o rastreamento de vários objetos em cenas dinâmicas para lidar com a oclusão

parcial de objetos. O algoritmo consiste em duas etapas na primeira etapa que usamos Misturas de Gaussianas para extrair objetos em movimento de uma sequência de vídeo. Em seguida, um método combinado é usado para remoção de sombra.

3. Resultados e discussão

De posse das pesquisas, de acordo com o Grupo de palavras chaves e agrupando conforme a base de dados, foi analisado dados relevantes como a linha de tempo de publicações, em função do ano de publicação, os autores que mais publicaram, os objetos mais frequentemente rastreados nos artigos selecionados e a escolha dos pares de métodos empregados na maioria dos artigos. Na Figura 32 é ilustrado o progresso de publicações com o Grupo de Palavras Chaves 1, onde relaciona na maioria dos trabalhos a implementação robusta do Filtro de Kalman para controle e determinação de padrões.

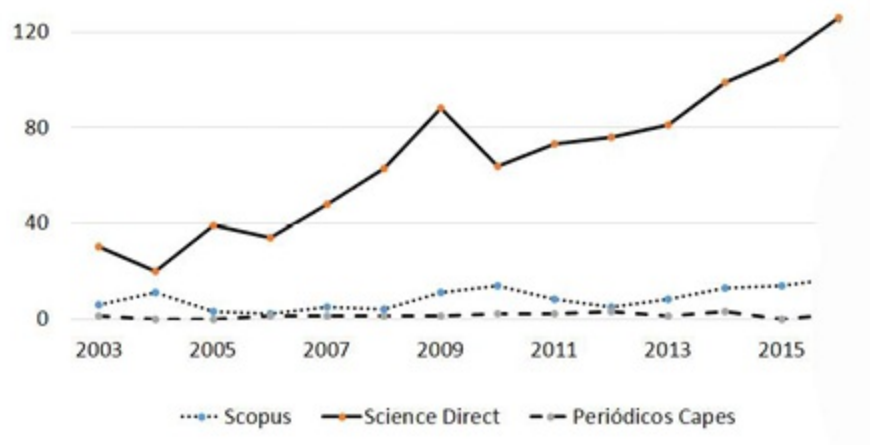


Figura 32. Número de publicações referentes ao grupo 1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 33 podemos ver o progresso de publicações com o Grupo de Palavras Chaves 2, onde obteve-se a prevalência trabalhos que atualizava a imagem de fundo usando a adaptação do método de Mistura de Gaussianas.

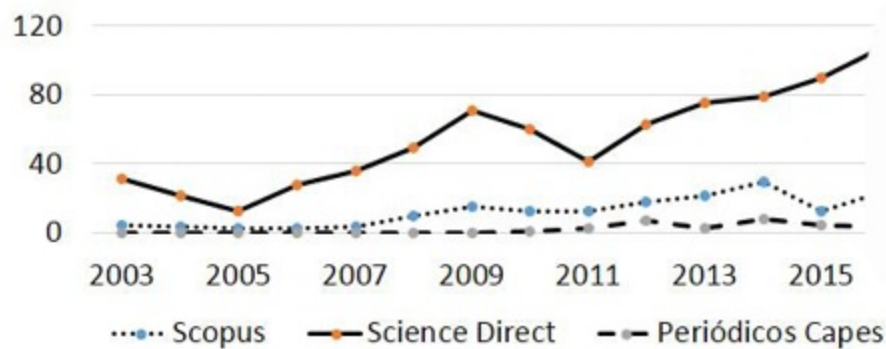


Figura 33. Número de publicações referente ao grupo 2

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 34 é mostrado a evolução do número de publicações do Grupo de Palavras Chaves 3. Desta forma, é possível analisar a natureza principal do Filtro de Kalman e o predomínio em aplicações envolvendo as duas fases bem definidas do Filtro: atualização do tempo e atualização de medição, e por fim, relacionando a capacidade de adaptação do método Mistura de Gaussianas.

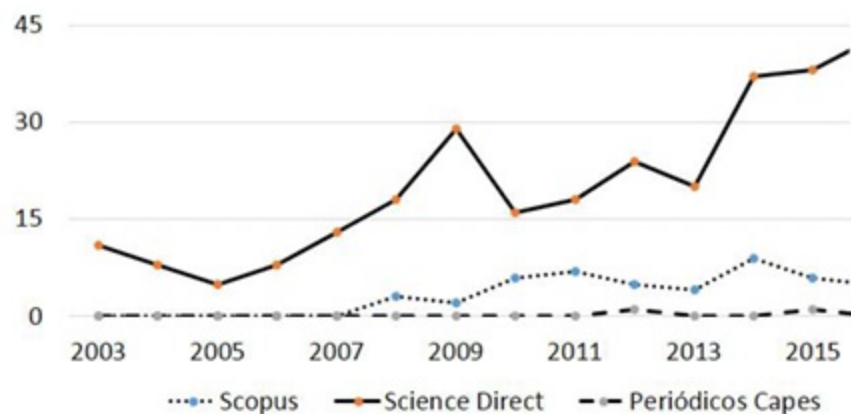


Figura 34. Número de publicações referente ao grupo 3

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após realizar a análise dos autores que obtiveram maior número de publicações, e realizar a busca de toda a literatura foi possível utilizar a

ferramenta Snowball que consiste em uma prática comum entre pesquisadores, selecionar um conjunto de artigos que são mais importantes em uma certa área de pesquisa e, a partir destes, identificar trabalhos relacionados relevantes (Souza et al., 2013). Na Figura 35 é possível ver os autores com maior número de publicações no Grupo de expressões chaves Kalman Filter and Object Detection and “Computer vision”.

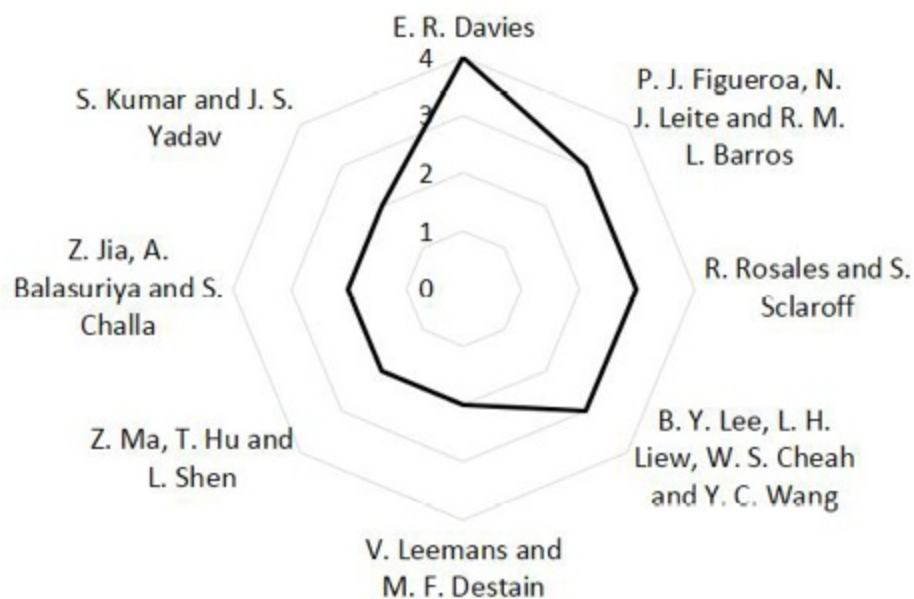


Figura 35. Autores com maior número de publicações referente ao grupo 1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 36 é ilustrado os autores com maior número de publicações, no Grupo 2 que possui as expressões Gaussian Mixture and Object Detection and “Computer vision”.

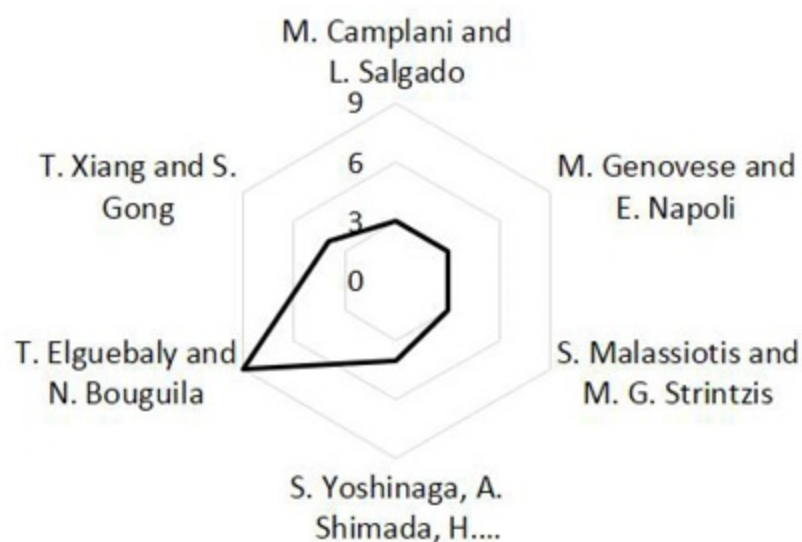


Figura 36. Autores com maior número de publicações referentes ao grupo 2

Fonte: Elaborado pelos autores.

Podemos ver na Figura 37 os autores que mais publicaram no Grupo de expressões chave 3. Logo ao buscar a localidade destes autores, nota-se uma relação entre Figuras 35, 36 e 37 onde os autores que obtiveram maior número de publicações estão inseridos em grandes polos tecnológicos e com grande financiamento governamental.

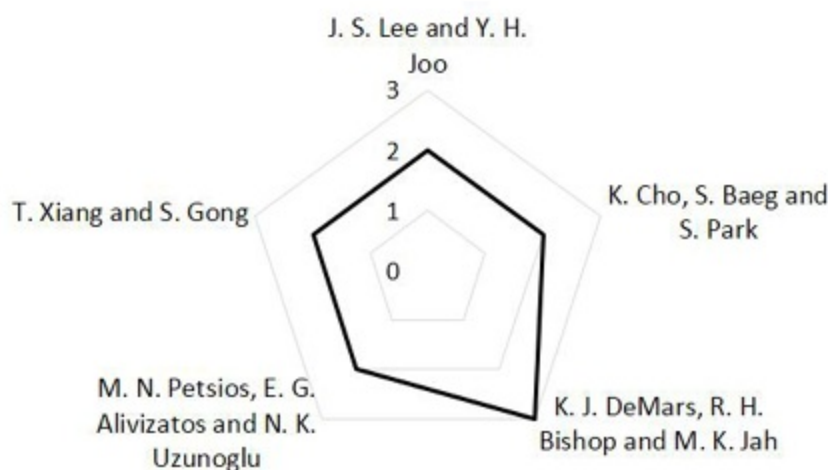


Figura 37. Autores com maior número de publicações referente ao grupo 3

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao selecionar os artigos, e após a revisão da literatura realizada, foi possível filtrar os principais objetos rastreados em vídeos, foi observado que rastreamento envolvendo pessoas e veículos são amplamente utilizadas como visto na Figura 38, isto porque engloba situações de tráfego intenso, jogos de futebol e basquete, no qual são rastreados jogadores para determinar possíveis infrações nas regras dos jogos. Animais como vacas e golfinhos são rastreados pelo fato de vacas causar acidentes, e os golfinhos para compreender seu complexo modo de comunicação.

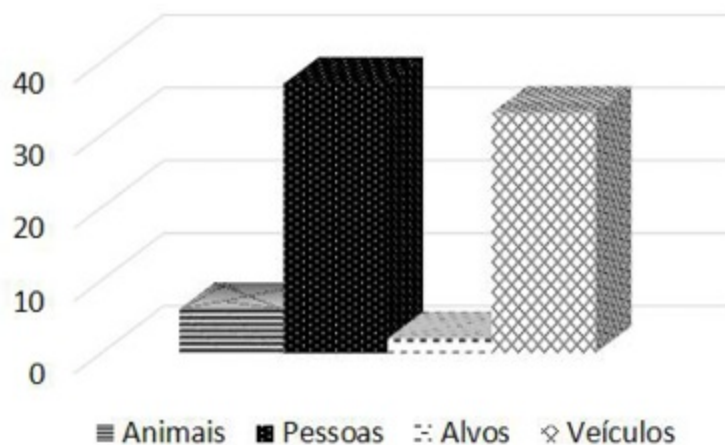


Figura 38. Principais objetos rastreados

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após selecionar os artigos e filtrar os artigos de interesse, foi visto que na maior parte dos artigos o Filtro de Kalman e Mistura de Gaussianas é acoplado a outros sistemas como por exemplo tratamento de imagens antes de inseri-las no algoritmo criado. A Figura 39 ilustra a relação dos métodos ligados ou não a outras ferramentas acopladas.

Ao selecionar os 74 artigos 30% deles compreendem o Filtro de Kalman e Mistura de Gaussianas acoplados a outros sistemas, 20% deles ao Filtro de

Kalman Acoplado a outros sistemas, 16% correspondem ao Filtro de Kalman somente, 14% equivale ao método de Mistura de Gaussiana Acoplada a outros sistemas, 8% representam o Filtro de Kalman e Mistura de Gaussiana somente e 12% ao método de Mistura de Gaussiana somente. Por fim, compreendeu-se que conectar dois métodos que envolvem matemática computacional foi interessante isto devido cada método lidar melhor com uma específica atividade, neste caso, Mistura de Gaussianas adaptou as rápidas modificações na imagem e o Filtro de Kalman rastreou os objetos utilizando a medição anterior.

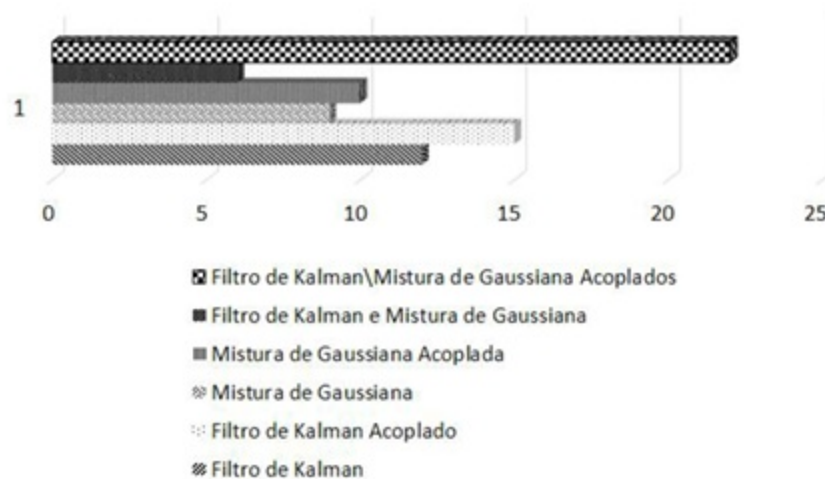


Figura 39. Principais junções dos métodos estudados

Fonte: Elaborado pelos autores.

Conclusões

A partir do levantamento sistemático realizado pode-se identificar que as publicações têm como finalidade a aplicação em sistemas de vigilância e aprimoramento da tecnologia envolvida nos processos.

Problemas identificados foram, a falta de detalhes para mostrar a posição dos autores no que se diz respeito ao uso da técnica escolhida, ou seja, o motivo

pelo qual se escolheu acoplar ou não outras ferramentas a sistemas como Filtro de Kalman e Mistura de Gaussiana.

Não foram encontradas revisões da literatura nacionais que manifeste os progressos da pesquisa que inclua o campo de visão computacional e processamento de imagem.

O campo de visão computacional indica a necessidade de um número maior de pesquisas, afim de se obter os benefícios, sejam eles empregados a vigilância ou rastreamento de quaisquer que sejam os objetos, dessa forma a revisão da literatura apresenta contribuições significativas sendo que ao iniciar projetos com esta finalidade, o pesquisador consegue saber qual base de dados melhor se adequa a sua pesquisa, os anos que obteve maior publicação, quem mais publica nesta área, que tipo de objeto mais tem sido rastreados e que métodos mais são utilizados em pares para conseguir os objetivos finais, logo, o trabalho possibilita conhecimento acerca da progressividade do tema pesquisado.

Para pesquisas futuras é interessante adicionar mais informações para os futuros pesquisadores da área de visão computacional são elas: Países que obtiveram maior número de publicações, e ao final, relatar os resultados obtidos na aplicação do trabalho, isto pode ser expresso, mostrando a curva de erros para os métodos estudados.

Referências

CHEN, Zezhi; ELLIS, Tim; VELASTIN, Sergio A. Vision-based traffic surveys in urban environments. **Journal of Electronic Imaging**, v. 25, n. 5, 2016.

_____. YAN, Yuyao; ELLIS, Tim. **Lane detection by trajectory clustering in urban environments**. In: 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC); 8-11, Qingdao, China [s.l.] [s.n.], oct. 2014. p. 3076-3081.

CHOI, Wongun; SAVARESE, Silvio. A unified framework for multi-target tracking and collective activity recognition. In: Proceedings of the 12th

- European Conference on Computer Vision. Florence, Italy: [s.n.], 2012. p. 2012.
- COIFMAN, Benn; et al. A Real-Time Computer Vision System for Vehicle Tracking and Traffic Surveillance. **Transportation Research Part C** 6, 1998.
- COURTNEY, Jonathan D. Automatic video indexing via object motion analysis. **Pattern Recognition**, v. 30, n. 4, p. 607-625, 1997.
- DALKA, Piotr; BRATOSZEWSKI, Piotr. Visual detection of people movement rules violation in crowded indoor scenes. **Communications in Computer and Information Science**, v. 368 CCIS, p. 48-58, 2013.
- FAKHARIAN, Ahmad; HOSSEINI, Saman; GUSTAFSSON, Thomas. Precise hybrid motion detection and tracking in dynamic background. In: 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) [S.l.: s.n.], 2011. p. 1398-1402.
- GUPTE, Surendra et al. Detection and classification of vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 3, n. 1, p. 37-47, 2002.
- HU, Hong-Yu; et al. Robust detection and tracking algorithm of multiple objects in complex scenes. **Applied Mathematics and Information Sciences**, v. 8, n. 5, p. 2485–2490, 2014.
- JACOB, Robert J. K.; KARN, Keith S. Eye tracking in human–computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In:_____. **The Mind’s Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research**. [S.l.]. Oxford; American Elsevier, 2003.
- JIA, Chengguo; LI, Quanhu; LI, Nan. Design and implementation of bus real-time human traffic statistics system. In: 2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1882-1886.
- KAMARAJ, Michael; BALAKRISHNAN. Surveillance of human tracking using gaussian beta-likelihood matching and kalman filter. **Journal of Applied Engineering Research**, v. 10, n. 14, p. 34375-34382, 2015.
- KIRATIRATANAPRUK, Kantip; SIDDHICHAI, Supakorn. Vehicle detection and tracking for traffic monitoring system. In: Proceedings of the IEEE Region 10 Conference (TENCON 2006). Hong Kong: [s.n.], 2006. p. 1-4.
- KITCHENHAM, B. What’s up with software metrics? – a preliminary

- mapping study. **Journal of systems and software**, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 37–51, 2010.
- KRERNGKAMJORNKIT, Rapee; SIMIC, Milian. Multi object detection and tracking from vídeo file. **Applied Mechanics and Materials**, v. 533, p. 218-225, 2014.
- LI, Zhidong; et al. Real-time system for tracking and classification of pedestrians and bicycles. **Transportation Research Record**, n. 2198, p. 83-92, 2010.
- MIRABI, Mahmoud; JAVADI, Shahram. People tracking in outdoor environment using kalman filter. In: 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation [S.l.: s.n.], IEEE, 2012, p. 303-307.
- PETROVSKAYA, Anna; THRUN, Sebastian. Model based vehicle detection and tracking for autonomous urban driving. **Autonomous Robots**, v. 26, p. 123-139, 2009.
- SOUZA, Rafael de; et al. Ramani: Uma ferramenta de apoio à colaboração durante a execução de estudos sistemáticos. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Colaborativos, 2013, Manaus, AM. Simpósio Brasileiro de Sistemas Colaborativos, [S.l.], 2013. p. 144.
- XIANG, Tao; GONG, Shaogang. Optimising dynamic graphical models for video content analysis. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 112, n. 3, p. 310-323, 2008.
- YILMAZ, Alper; JAVED, Omar; SHAH, Mubarak. Object tracking: A survey. **ACM Computing Surveys**, v. 38, n. 4, Article 13, p. 1-45, 2006.

Notas

- 21.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Bolsista de Produtividade em Pesquisa FAPEG - Nível 2. Contato: karlamelissaleandro@gmail.com.
- 22.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: iago.ufg@gmail.com.
- 23.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão Unidade Acadêmica Especial de Biotecnologia Contato: sergio.f.silva@gmail.com.
- 24.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: rabelo@dmate.ufpe.br.

Análise de padrões em gráficos de controle aplicados a vibrações

*Karla Melissa dos Santos Leandro*²⁵

*Iago Ferreira Lima*²⁶

*Werley Rafael da Silva*²⁷

*Marcos Napoleão Rabelo*²⁸

Resumo: Este trabalho apresenta o uso do Gráfico de Shewhart para realizar o reconhecimento de padrões em um dado sistema. Este sistema compreende uma bancada experimental montada para realização de análises de vibrações. Similarmente a uma mesa vibratória, foi acoplado dois acelerômetros afim de captar os dados advindos do sistema. Inicialmente foi escolhido o deslocamento proveniente de vibrações mecânicas para analisar qual padrão acontece nesse tipo de gráfico, e aplicar a ferramenta da qualidade em sistemas naturais induzidos. O método proposto considera as regras sensibilizantes e as separa no gráfico a partir de zonas, criadas de acordo com o grau de confiabilidade proposta por Shewhart.

Palavras-chave: Gráfico de Shewhart. Análises de Vibrações. Grau de Confiabilidade.

Introdução

Existem diversas fontes de vibrações mecânicas em uma estrutura. A principal fonte de ruído em um sistema de vibrações é o motor. Existem cinco possíveis caminhos de transmissão de energia associados à difusão de vibração, incluindo o sistema de montagem, que consiste no suporte do motor, montagens de isolamento, e fundação, são eles: a pilha de escape; o combustível; o sistema de entrada e refrigeração; o eixo de transmissão e a

radiação do ar o motor (Akpan et al., 1999). Através destes caminhos, a energia causa a propagação de vibrações em toda a estrutura (Cinquemani; Braghin, 2017).

O Gráfico estatístico de qualidade surge como uma alternativa para melhorar e monitorar a qualidade de um sistema, esse controle ocorre através de gráficos de controle que são eficientes e simples de monitorar a média e variabilidade da característica observada. Suas medidas são executadas em pontos espaçados no tempo, resultando em gráficos temporais, que quando comparado aos resultados obtidos nos limites de controle, indicam causas especiais de variabilidade ou processo com anomalias que prejudicam a qualidade. Os gráficos de controle mais usados são: Shewhart (X-bar), média móvel ponderada exponencialmente (EWMA) e Soma cumulativa (CUSUM) (Andrade et al., 2017).

O controle estatístico de qualidade foi adequado para determinar a variabilidade do processo, logo, o gráfico de controle foi aplicado ao sistema de vibrações por meio de uma bancada experimental para medição de vibrações em uma plataforma similar a uma mesa. O sistema proposto para este tratamento, abrange o uso da ferramenta da qualidade para a análise de sistemas físicos naturais, como o de vibração, que foi induzido por um motor com massa desbalanceada.

Este artigo está estruturado de maneira que no Capítulo 1 houvesse uma introdução acerca dos estudos específicos de vibrações em estruturas. No Capítulo 2 iremos apresentar as características do Controle Estatístico do Processo, com breves seções expondo as ferramentas do controle estatístico, a análise sobre a escolha do tamanho da amostra envolvida, e a base teórica para a avaliação dos Padrões em Gráficos de Controle. No Capítulo 3 é expresso a metodologia do trabalho. No Capítulo 4 teremos os resultados e discussões e por fim, no Capítulo 5 iremos apresentar a conclusão da realização deste trabalho.

1. Controle estatístico do processo

A medição de dados é fundamental para a melhoria da qualidade em processos industriais. Os dados para análise da qualidade, no entanto, são medidos para uma população específica durante um período de tempo fixo (Gupta; Kaplan, 2017). Neste trabalho fornecemos uma visão geral prática de ferramentas da Qualidade como o gráfico de controle Shewhart, para monitorar a qualidade de um sistema, identificar possíveis erros ou danos e sinalizar para o gestor responsável possíveis tomadas de decisões.

1.1 Ferramentas do Controle Estatístico do Processo

Segundo Montgomery (2000) um produto deve corresponder às exigências do cliente, deve ser produzido por um processo que estabeleça estabilidade e replicabilidade. De outra forma, este processo precisa possuir baixa variabilidade em torno da dimensão alvo. O método exposto por Shewhart abrange 7 principais ferramentas, porém neste artigo abordaremos apenas o Gráfico de controle.

1. Apresentação em Histograma ou Ramo de Folhas.
2. Folha de Controle.
3. Gráfico de Pareto.
4. Diagrama de causa e efeito.
5. Diagrama de Concentração de defeito.
6. Diagrama de Dispersão.
7. Gráfico de Controle.

1.2 Tamanho da Amostra e Frequência de Amostragem

Em gráficos de controle o objetivo é detectar efeitos negativos sobre os resultados e identificar sua fonte potencial. Embora os gráficos de controle possam ter uma variedade de formas, basicamente, são uma representação gráfica dos valores e suas características referente ao processo industrial

ocorrendo. O resultado dessa investigação é plotado sequencialmente. O princípio dos gráficos de controle é simples e pode ser estruturado em três etapas (Simonet, 2005):

1. Avaliar uma amostra durante o processo;
2. Medir o identificar de qualidade;
3. Marcar o resultado do gráfico obedecendo seus respectivos limites.

Para realizar o gráfico de controle de forma a diminuir qualquer influência é realizado o cálculo do número de amostras utilizadas. Neste planejamento é necessário especificar o tamanho da amostra a ser utilizada. Desta forma, poderemos avaliar pequenas mudanças no processo. Para realizar esta análise costuma-se plotar a curva característica de operação do gráfico para vários tamanhos de amostras como expresso na equação 1 (Montgomery, 2007).

$$Pa = P(d \leq c) = \sum_{d=0}^c \frac{n!}{d! (n-d)!} p^d (1-p)^{n-d} \quad (1)$$

Em um plano de amostragem única n é representado como o itens dentro da amostra. Logo d é o numero de defeitos dentro deste lote. Fixado o número de aceitação c , aceitamos o lote se $d \leq c$ e é rejeitado $d \geq c$. Logo a distribuição do número de defeitos d em uma amostra de n itens será binomial ($N \rightarrow \infty$) e p será a fração de itens defeituosos.

1.3 Base Estatística para o Gráfico de Controle

O Gráfico de Shewart rastreia a evolução da média da amostra de um processo univariante em amostras racionais de tamanho n . Quando os dados adquiridos não obedecem uma distribuição normal, alguns gráficos alternativos para monitorar a média da amostra são propostos, seja para uma característica de qualidade de uma dada família de distribuições, ou para distribuições com uma dada forma especificada (Casco; Lopez-Diaz, 2017).

Para a criação de um gráfico de controle Shewhart o valor de uma determinada característica de um subgrupo consiste em uma linha central representada pela média μ que está localizada em um valor de referência da característica plotada.

De acordo Fu, Wang e Dong (2017) o valor de referência para o controle de processo geralmente é o valor de tempo gasto pela observação conforme indicado nas especificações do produto, ou um valor nominal da observação que está sendo plotada com base na experiência passada com o processo, ou a partir de valores implícitos de destino de produto ou serviço.

O gráfico de controle possui dois limites de controle determinados estatisticamente, um de cada lado da média μ , que são chamados de limite de controle superior (LSC) e limite de controle inferior (LIC). Os limites de controle nos gráficos Shewhart estão a uma distância de 3σ em cada lado de μ , onde σ é o desvio padrão do subgrupo dentro da população que está sendo plotada. A variabilidade dentro do subgrupo é usada como uma medida da variação aleatória. As definições e fórmulas são as seguintes (Montgomery, 2007).

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i/n \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})^2)}{N-1}} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Finalmente do Gráfico de Controle Shewhart é dado por:

$$LSC = \mu_{\omega} + L^* \sigma \quad (5)$$

$$\mu_{\omega} = \bar{X} \quad (6)$$

$$LIC = \mu_{\omega} - L^* \sigma \quad (7)$$

Segundo Montgomery (2009) o gráfico de controle é uma ferramenta vasta com aplicabilidade em diversas áreas e oportuno de várias maneiras, umas delas é para descrever de maneira precisa, diretamente o que se entende por controle estatístico de qualidade. Desta forma, realiza uma vigilância on-line do processo, sinalizando quando ocorre quebra de controle estatístico, o que exigirá do gestor responsável medidas afim de amenizar o descontrole estatístico.

1.4 Avaliação dos Padrões em Gráficos de Controle

O reconhecimento de Padrões em Gráficos de controle possui uma fase sistemática ou não-aleatória, logo, podemos detectar as razões pelas quais os gráficos seguem ou não um controle estatístico. Conhecer o processo estatístico atribui maior sucesso e qualidade para o sistema em geral (Montgomery, 2009). Segundo Electric (1956) um conjunto de regras de decisão pode ser usado para identificar padrões não aleatórios em gráficos, são (Montgomery, 2007).

1. Um ponto de localiza fora dos limites de controle com três sigmas;
2. Dois, em três locais consecutivos, e após de dois sigmas de limites;
3. Quatro, em cinco pontos consecutivos, se localizam a uma distância de um sigma ou mais em relação à media;
4. Oito pontos consecutivos se localizam de um mesmo lado da linha central.

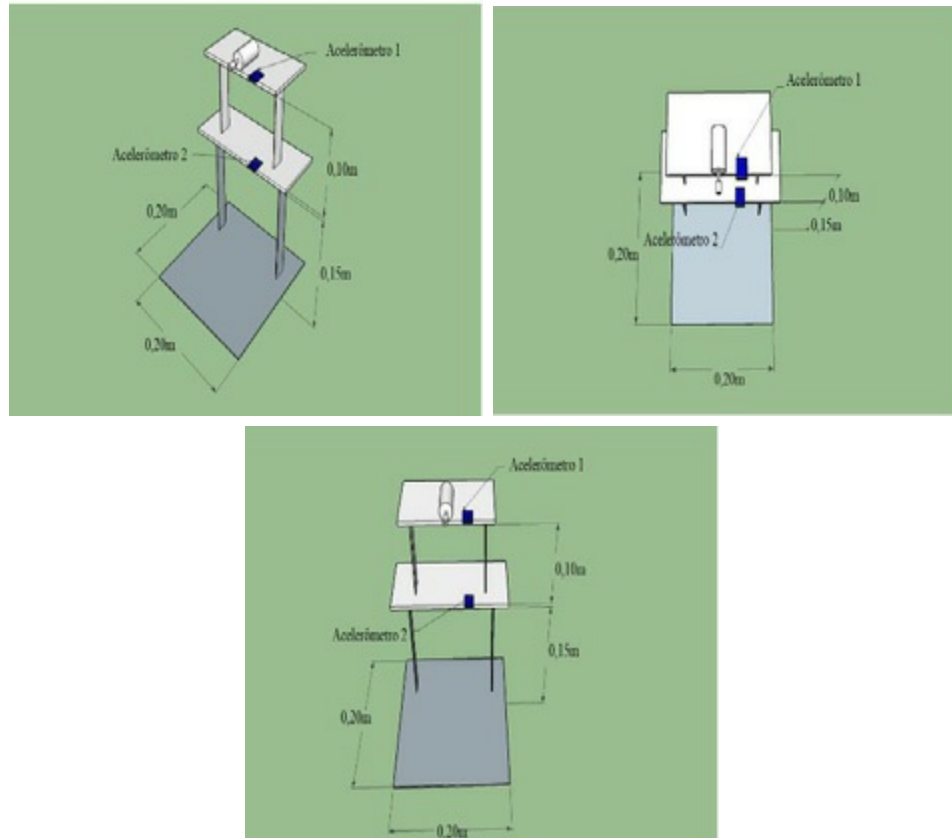
Com a classificação de Western é possível classificar regras de zonas, e aplicá-las a um lado da linha central e salientar a sensibilidade em gráficos de controle.

2. Metodologia

Este capítulo tem como objetivo descrever os procedimentos para desenvolvimento do aparato experimental utilizado na obtenção dos valores que foram utilizadas análise deste artigo. Dessa forma, foi montado uma plataforma que possibilitou a análise do deslocamento em 2 níveis diferentes. Com esta Plataforma foi utilizado sensores interligados a um sistema de aquisição de dados. Após esta fase, foi possível obter valores que possibilitou a obtenção do modelo para tratamento desses dados.

2.1 Aparato Experimental

O aparato desenvolvido, como mencionado no tópico anterior, é ilustrado esquematicamente na Figura 40. Trata-se de uma plataforma que possibilitou a aquisição dos dados pretendidos para posterior tratamento dessas informações. Esse aparato experimental é composto de duas placas metálicas rígidas sustentadas por lâminas paralelas. A placa superior tem 0,15 m de comprimento e uma espessura de 4,76 mm e a placa inferior tem 200 mm de comprimento e 4,76 mm de espessura. Na placa superior foi acoplado um motor de corrente contínua alimentado com uma tensão de 6,8 V por uma fonte geradora de tensão modelo DC POWER SUPPLY FA- 3003, da marca Instrutherm, esse valor de tensão colocou o sistema em ressonância e proporcionou assim maiores amplitudes de vibrações, uma vez que o eixo desse motor foi desbalanceado propositalmente, permitindo chegar a valores ideais para a análise.



(a) Vista Lateral (b) Vista Superior (c) Vista Frontal

Figura 40. Aparato desenvolvido

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para medir o sinal de aceleração, e posteriormente realizar a integração do sinal de aceleração para obter ao final o sinal de deslocamento, foi utilizado dois acelerômetros do modelo GY-61 (ADXL335), esses acelerômetros foram acoplados em cada placa metálica para proporcionar a leitura em intensidades diferentes. O acelerômetro é um sensor que possibilita a medição dos eixos nomeados X, Y e Z, mas que, no nosso estudo será utilizado apenas o eixo Y.

Após a montagem do aparato experimental que proporcionará as informações necessárias para alcançar os objetivos desse estudo, foi necessário a ligação dos sensores instalados nas placas metálicas superior e inferior a um sistema de aquisição de dados. Esse sistema é composto de uma

placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo NI USB-6008. O eixo Y do sensor superior foi ligado na porta de entrada AI0 da placa de aquisição e o sensor da placa inferior na porta AI1 da mesma placa.

2.2 Aquisição de dados

Com o aparato experimental montado e já ligado na placa de aquisição de dados, foi necessário a programação do software de aquisição de dados, que não é objeto de estudo desse artigo, por esse motivo será omissa. Para demonstrar o que essa programação realiza foi montado um diagrama de blocos que tem por finalidade expressar o procedimento de integração dos valores obtidos até chegar aos valores de deslocamento. A Figura 41 mostra o diagrama ilustrado desenvolvido.

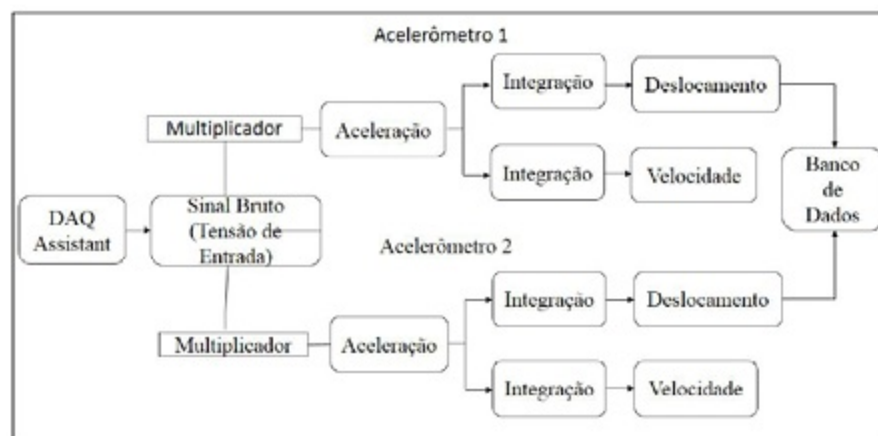


Figura 41. Plataforma para análise dos dados

Fonte: Elaborado pelos autores.

O bloco *DAQ Assistant* representa o driver da placa de aquisição de dados, sendo o ponto de entrada das informações do acelerômetro. O acelerômetro emite sinal bruto de tensão na sua saída, sendo esse proporcional a sua aceleração. A partir da aceleração ocorrem as integrações desse sinal em cada acelerômetro instalado, tendo assim os sinais de velocidade e de deslocamento, este último, objeto do nosso estudo, é

interligado a um banco de dados que gera um arquivo com esses valores para serem utilizados no filtro.

3. Resultados e discussão

Ao determinar o planejamento para o Gráfico de Controle, foi realizado testes para identificar qual seria o tamanho da amostra ideal para a especificidade da análise realizada em laboratório, com este intuito, foi testado amostras de tamanhos diversificados como visto na Figura 42, notou-se que quanto maior o número de observações dentro da amostra, mais chances de detectar pequenas mudanças no processo, o que torna a análise realizada mais sensível a flutuações no gráfico, consequentemente foi adotado o tamanho da amostra com 50 observações como explicitado abaixo, com isso obtemos menor probabilidade de obter um sistema fora de controle estatístico.

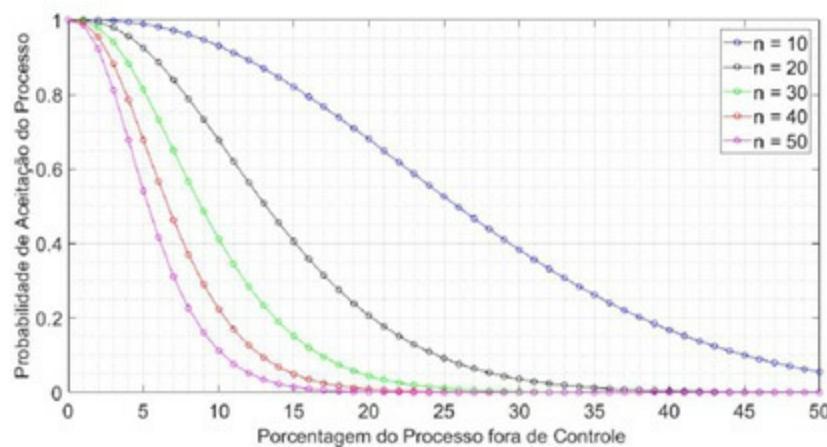


Figura 42. Teste para a escolha do tamanho da amostra

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após obter o número ideal do tamanho da amostra, foi possível analisar o processo de uma maneira panorâmica, logo, foi utilizado as Regras de Zonas de Wernen para avaliar o grau de confiabilidade no processo. Na Figura 43

nota-se que a Zona A é delimitada por 3σ de confiança, a Zona B é demarcada por 2σ de confiança, e a Zona C é delimitada por 1σ de confiança.

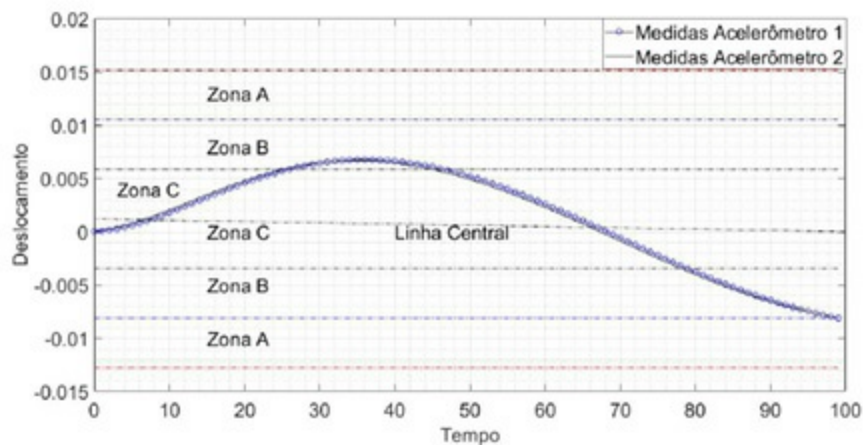


Figura 43. Processo Panorâmico

Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerações finais

A utilização de gráficos de controle para reconhecer padrões oferece a possibilidade de acompanhar o processo e sinalizar para os gestores possíveis defeitos ou irregularidades no sistema. Aplicando o gráfico de controle como ferramenta, foi possível notar que se fosse necessária mais força para realizar qualquer tipo de atividade, o motor gasto na plataforma não conseguiria sucesso. Esse fato foi descoberto graças ao gráfico de controle utilizado.

Ao atentar para a real visualização do gráfico de controle, foi verificado na Figura 43, que o processo consiste em um processo fora de controle. De acordo com as Regras de Zonas de Wertern, podemos perceber que as medidas referentes ao acelerômetro 1 e 2 até o tempo de 20 Segundos, fere as definições das Regras, isto, devido aos valores referentes a 4 regra, ao salientar que quando temos 8 pontos de um mesmo lado da linha de controle, o mesmo se caracteriza como sendo um padrão não aleatório e sinaliza que estamos diante de um processo fora de controle estatístico.

Outra característica notável na Figura 43 é a perda de energia de acordo com o passar do tempo. Quando nos referimos a classificação de vibrações mecânicas, são citadas as vibrações livres ou forçadas e ao seu amortecimento. Quanto ao deslocamento, podemos obtê-lo sendo retilíneos, torsional ou a mistura dos dois. De acordo com o gráfico utilizado, nota-se que o mesmo condiz com a realidade ao referimos a perda de energia com o passar do tempo.

Com a finalidade de aprendizagem, concluímos que acoplar o gráfico de controle Shewhart a uma análise de vibração é satisfatório, devido ao entendimento da natureza do movimento, ou seja, dessa forma, foi possível identificar como transcorreu o processo, além de caracterizá-lo como um sistema vibratório e compará-lo a um processo industrial, o que possibilitou mais experiência com o uso de ferramentas da Qualidade aplicada a sistemas vibratórios.

Referências

- AKPAN, U. et al. **Active noise and vibration control literature survey: controller technologies**. [S.l.], 1999.
- ANDRADE, Maurício G. de et al. Statistical quality control for the evaluation of the uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. Supplement C, p. 743-753, 2017.
- CASCOS, Ignacio; LOPEZ-DIAZ, Miguel. Control charts based on parameter depths. **Applied Mathematical Modelling**, v. 53, 2018.
- CINQUEMANI, Simone; BRAGHIN, Francesco. Decentralized active vibration control in cruise ships funnels. **Ocean Engineering**, v. 140, n. Supplement C, p. 361-368, 2017.
- WESTERN Electric Company. **Statistical quality control handbook**. Easton: The Mack Printing Company, 1956.
- FU, Xiang; WANG, Ran-feng; DONG, Zhi-yong. Application of a shewhart control chart to monitor clean ash during coal preparation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 158, n. Supplement C, p. 45-54, 2017.

GUPTA, Munish.; KAPLAN, Heather C. Using statistical process control to drive improvement in neonatal care: A practical introduction to control charts. **Clinics in Perinatology**, v. 44, n. 3, p. 627 – 644, 2017. Quality Improvement.

MONTGOMERY, Douglas. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2009.

_____. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. São Paulo: Grupo Gen-LTC, 2000.

_____. **Introduction to statistical quality control**. New York: John Wiley & Sons, 2007.

SIMONET, B. Quality control in qualitative analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 24, n. 6, p. 525-531, 2005. Modern qualitative analysis.

Notas

25. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do FAPEG - Nível 2. Contato: karlamelissaleandro@gmail.com.

26. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: iago.ufg@gmail.com.

27. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: werleyrafael2@gmail.com.

28. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: rabelo@dmf.ufpe.br.

Planejamento operacional de mina a céu aberto com uso de simulação computacional

*Brener Gonçalves Vaz*²⁹

*Ana Clara Soares Bicalho*³⁰

*Stella Jacyszyn Bachega*³¹

*Dalton Matsuo Tavares*³²

Resumo: Nas últimas décadas, as empresas têm buscado, crescentemente, a redução de gastos, o gerenciamento do conhecimento e a flexibilização dos meios de produção e serviços. Há técnicas/ferramentas que permitem a análise dos processos empresariais e auxiliam na obtenção de melhorias contínuas dos processos produtivos, dentre elas está a simulação computacional. O objetivo deste artigo é elaborar um modelo de simulação aplicado em minas a céu aberto, voltado para a atividade de planejamento operacional. Para tanto, utilizou-se a abordagem de pesquisa quantitativa e o procedimento de pesquisa experimental, devido ao uso de simulação computacional. Representou-se no simulador, um cenário hipotético de planejamento operacional, considerando aspectos práticos em minas a céu aberto. Dentre os resultados obtidos, verificou-se que as escavadeiras atingiram, em média, 99,97% de utilização. Este artigo contribui para uma melhor percepção da importância do planejamento operacional na mineração, assim como do processo de simulação de minas a céu aberto.

Palavras-chave: Simulação. Planejamento Operacional. Minas a céu aberto.

Introdução

A necessidade por competência no meio produtivo empresarial é uma procura frequente, uma vez que o mercado está cada vez mais competitivo e os custos associados a produção estão sempre aumentando. Empreendimentos de sucesso vêm procurando meios para redução de custos e aumento da produção, prezando o meio ambiente e, também, o desenvolvimento sustentável (Ribeiro, 2015).

Neste cenário, as empresas deveriam promover melhorias contínuas dos processos produtivos, na tentativa de assegurar a competitividade no mercado. Assim, organizar um planejamento estratégico da produção e seu controle de modo eficiente, otimizar os recursos humanos e físicos, rever os preços praticados na venda dos produtos, garantir qualidade e agilidade, podem ser formas de implantar melhorias (Pantuza Júnior, 2008).

Na mineração, o sistema produtivo é caracterizado por um ciclo longo de produção e operação, integrado, em série e contínuo, desde a mina, passando pelo beneficiamento, transporte, aglomeração, quando for o caso, estocagem de produtos acabados e distribuição (Castro Neto, 2006).

Há várias formas de extração de minério, dentre elas a mineração/lavra a céu aberto. Lavra a céu aberto é uma mina onde a extração de minério ocorre na superfície. Nas atividades operacionais, grande parte dos recursos: carregadeiras, britadores, vias de acessos, são compartilhados, um modelo de simulação pode ser construído para reproduzir a operação do ambiente visando obter o melhor desempenho operacional (Ribeiro, 2015).

Pesquisas com foco em minas a céu aberto possuem relevância e importância para a área, como pode ser observado em Ataepour e Baafi (1999), Arteaga, Nehring e Knights (2017), Dindarloo, Osanloo e Frimpong (2015), Eskandari, Darabi e Hosseinzadeh (2013), Forsman, Ronnkvist e Vagenas (1993), Goodfellow (2016), Hashemi e Sattarvand (2015), Kolonja e Mutmansky (1995), Soumis, Ethier e Elbrond (1989), entre outros.

Kolonja e Mutmansky (1995) desenvolveram um modelo de simulação para analisar estratégias de despacho. Já Ataeeepour e Baafi (1999) trabalharam em um modelo de simulação para analisar operação de caminhão e de pá carregadeira. O primeiro passo foi monitorar o efeito do número de caminhões na utilização do sistema e em seguida, aplicar uma regra de despacho visando minimizar os tempos de espera dos caminhões. Hashemi e Sattarvand (2015) utilizaram a simulação computacional para análise das operações da segunda maior mina de cobre do Irã. Eskandari, Darabi e Hosseinzadeh (2013) também apresentaram uma aplicação real da simulação, com foco no sistema de transporte limitado de uma mina de cobre a céu aberto no Irã.

Ademais, Costa, Souza e Pinto (2004) advogam que o planejamento operacional se preocupa, ainda, em gerenciar os equipamentos de carga. Para tanto, é necessário considerar as metas de produção e de qualidade, além das restrições operacionais da mina (Costa; Souza; Pinto, 2004).

Deste modo, o objetivo do artigo é elaborar um modelo de simulação aplicado em minas a céu aberto, voltado para a atividade de planejamento operacional. A justificativa dessa pesquisa se embasa na importância do referido tema quanto a necessidade de análise do comportamento de sistemas reais para o melhor dimensionamento de seu funcionamento.

Salienta-se que a presente pesquisa possui vínculo com o Grupo de Estudos em Modelagem e Simulação (GEMS) e que faz parte do projeto de pesquisa intitulado “Proposta de uso de otimização baseada em simulação para planejamento operacional de minas a céu aberto”.

A estrutura do artigo é a que segue: na seção um há o referencial teórico sobre mineração e simulação computacional; na seção dois há a metodologia da pesquisa; na seção três estão os resultados e discussão; e, por fim, são apresentadas as considerações finais.

1. Referencial teórico

A mineração trata do processo de extração de minerais que estão concentrados naturalmente no subsolo. A extração de minerais envolve várias etapas de processamento, a saber: pesquisa e exploração, lavra e beneficiamento (Lopes, 2014).

De acordo com Macêdo, Bazarte e Bonates (2001), a mineração depende de técnicas de extração para viabilizar a produção. Há dez métodos de lavra que são destaque, no entanto, há mais de trezentas variações possíveis de métodos de lavra. A seleção do método depende da disponibilidade de equipamentos necessários para viabilizar as técnicas de extração. Há momentos em que é necessário desenvolver novos equipamentos para viabilizar estas técnicas (Lopes, 2014).

Lopes (2014) enfatiza que na mineração há a exploração de recursos minerais em minas subterrâneas ou a céu aberto. A escolha do método usado deve considerar aspectos tecnológicos, sociais, econômicos e ambientais (Macêdo; Bazarte; Bonates, 2001).

Quanto ao planejamento operacional, este trata do planejamento de curto prazo. O objetivo primário é definir o ritmo de lavra que deverá ser implementado em cada frente, propiciando a alimentação adequada da usina de beneficiamento. Destaca-se que várias empresas do setor mineral desenvolvem o planejamento via tentativa e erro, com base na experiência do analista, o que pode gerar resultados ineficientes e com altos custos (Costa, 2005; Guimarães; Souza; Pantuza Júnior, 2007).

Os custos referidos dizem respeito à distância entre as pilhas de estéril (local onde é depositado) e as frentes de estéril (material considerado sem valor comercial). Assim, o objetivo do planejamento operacional de uma lavra de uma mina a céu aberto, que tenha alocação dinâmica, é a determinação do ritmo de lavra em cada frente (Pantuza Júnior, 2008).

Segundo Pantuza Júnior (2011), para definir o ritmo, quantifica-se o minério a ser extraído, o modelo e a quantidade de caminhões a serem

carregados nas frentes de lavra e a granulometria do minério. Também, é feita a alocação de um equipamento de carga em dada lavra.

2. Metodologia

A explicação científica empregada foi hipotético-dedutiva (Carvalho, 2000), pois foi levantada proposições para elaboração do modelo de simulação. A abordagem de pesquisa quantitativa foi utilizada, devido as características dos dados utilizados (Bryman, 1989).

Os procedimentos de pesquisa mais usados em Engenharia de Produção, conforme Berto e Nakano (1998; 2000), são: experimental, estudo de caso, teórico-conceitual, *survey* (pesquisa de avaliação), e pesquisa-ação. O procedimento de pesquisa experimental foi empregado, devido ao uso de simulação computacional.

Segundo Bryman (1989), o procedimento de pesquisa experimental, é mais aconselhado para abordagens quantitativas. Este procedimento também pode ser utilizado em pesquisas que envolvem modelagens matemáticas e simulações computacionais, sendo este último o utilizado na presente pesquisa.

A simulação empregada foi do tipo matemática, de modo numérico e estocástico. Foram seguidos os passos para o desenvolvimento da simulação sugeridos por Law e Kelton (2000), a saber:

1- Formular o problema e planejar o estudo: foi realizada a verificação e a adequação do problema e objetivos do estudo, considerando-se a quantidade de pessoas envolvidas, custos, entre outros.

2- Coletar dados e definir o modelo: o modelo conceitual do sistema hipotético estudado foi elaborado com base em dados secundários coletados em referências da área.

3- Validar o modelo: foram realizados testes, que verificaram se o modelo conceitual foi concebido adequadamente de acordo com a realidade a ser

representada.

4- Construir o programa computacional e verificar: nesta etapa foi verificado de qual forma o modelo de simulação deveria ser programado.

5- Realizar execuções piloto: o modelo foi executado diversas vezes, com o intuito de validá-lo ou não.

6- Validar o modelo: por meio dos resultados das execuções piloto, foi determinado se o modelo estava adequado com o sistema estudado.

7- Projetar os experimentos: foram definidas as condições iniciais da simulação, a duração, o número de replicações, entre outros.

8- Realizar execuções de simulação: nesta etapa foram realizadas simulações e execuções repetidas vezes, com a finalidade de determinar os resultados e medidas de desempenho.

9- Analisar os resultados: os resultados foram analisados por meio da utilização de técnicas estatísticas, determinando se os objetivos almejados foram alcançados.

10- Documentar, apresentar e implementar os resultados: foi organizada a documentação do estudo realizado, de forma a facilitar uma possível alteração e continuidade da pesquisa. A apresentação e a implementação dos resultados não foram o foco desta pesquisa, por se tratar de um modelo hipotético elaborado com base em dados secundários presentes na literatura.

Para a elaboração do modelo conceitual, para a posterior programação do modelo computacional, foi usada a técnica IDEF-SIM, conforme as instruções de Leal (2003), Leal et al. (2007) e Leal, Almeida e Montevechi (2008). O software de simulação ProModel® foi utilizado para realizar a simulação computacional.

De acordo com Freitas Filho (2008), para que se tornasse possível a modelagem, simulação e análise do sistema estudado, o mesmo foi considerado um sistema terminal. Deste modo, para a identificação do intervalo de confiança de cada medida de desempenho, foi considerado um

nível de confiança de 95%. O valor do semi-intervalo de confiança (*half-width*) foi interpretado de acordo com Kelton, Sadowski e Sadowski (2002), ou seja, os valores obtidos estão no intervalo da média e do semi-intervalo em 95% das replicações.

3. Discussão e resultados

Foi feito um estudo bibliográfico para caracterização de um cenário segundo a realidade de uma mina a céu aberto, a partir de artigos relacionados com o tema abordado. Assim, o trabalho de Branco (2013) serviu de base para a elaboração de um cenário hipotético aplicado em minas a céu aberto, com foco na atividade de planejamento operacional.

Foi utilizada a técnica de modelagem conceitual proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008), nomeada IDEF-SIM. Esta técnica possui como característica principal sua identidade lógica de aplicação. Combina elementos de outras duas técnicas já consagradas de modelagem de processos, como *Business Process Modeling* (BPM), o IDEF0 e IDEF3. Desta forma, a interpretação dos símbolos e aplicação torna-se mais rápida e fácil. O IDEF-SIM foi construído com apoio do software DIA®, considerando as entidades (minério e estéril), as funções (locais onde as atividades serão desempenhadas, ex.: local de escavação, locais de carregamento, local de basculamento, locais de espera em fila), recursos (escavadeira, carregadeiras, caminhões fora de estrada) e os fluxos dos processos.

O modelo conceitual se baseia nas operações de uma mina a céu aberto. Há duas entidades, uma denominada de minério (E1) e a outra de estéril (E2). As entidades foram retiradas da função local de escavação (F1) por meio do recurso escavadeira (R1). Após a escavação, cada entidade é levada para um local específico por meio dos recursos escavadeira (R1) ou carregadeira (R2), dependendo da disponibilidade. Para a entidade minério, realiza-se o

transporte para o local do minério escavado (F2). Já para a entidade estéril, o transporte é feito para o local do estéril escavado (F3).

Após sua chegada no local do estéril escavado, o estéril é transportado para o local de depósito do estéril (F7) por meio do recurso caminhão fora de estrada (R3). Já em relação ao minério, após sua chegada ao local do minério escavado, o mesmo é transportado para o local de armazenagem de minério em Pulmão (F4) por meio do recurso caminhão fora de estrada (R3).

Posteriormente, se o britador estiver disponível, o minério é transportado para o local de basculamento de minério (F6), utilizando também o recurso caminhão fora de estrada (R3). Se o britador não estiver disponível no momento, o minério aguarda na fila de espera do minério (F5), sendo transportado posteriormente para o local de basculamento de minério, quando disponível. Tanto o minério quanto o estéril seguem então para o fim do processo. O minério é o objeto de interesse do estudo. O modelo conceitual pode ser visto na Figura 44 e a legenda utilizada está na Tabela 24.

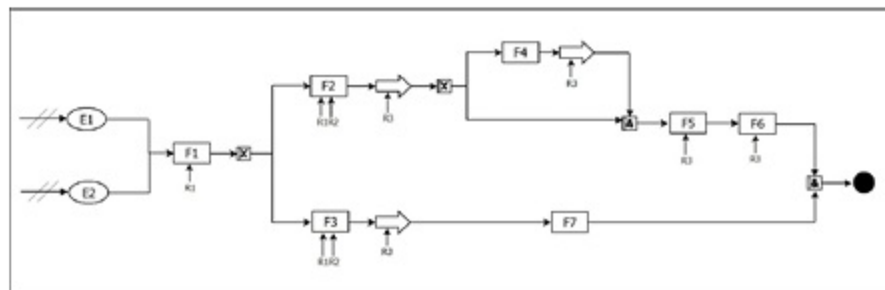


Figura 44. Modelo conceitual IDEF-SIM

Fonte: Os autores.

Para o desenvolvimento da biblioteca gráfica e das imagens de fundo representativas para simulação do transporte de minério no software ProModel[®], foram utilizadas ferramentas gráficas. A Figura 45 ilustra a modelagem final do *open pit* (cava) da mina a céu aberto.

Entidades	Nomes	Funções	Nomes	Recursos	Nomes
E1	Minério	F1	Local de escavação	R1	Escavadeira
E2	Estéril	F2	Local do minério escavado	R2	Carregadeira
		F3	Local do estéril escavado	R3	Caminhão Fora de estrada
		F4	Local de armazenagem de minério em Pulmão		
		F5	Fila de espera do minério se britador não disponível		
		F6	Local de basculamento de minério		
		F7	Local do depósito de estéril		

Tabela 24. Identificação dos elementos do IDEF-SIM

Fonte: Os autores.



Figura 45. Imagem do *open pit* utilizado da mina a céu aberto

Fonte: os autores.

Assim, foram elaboradas as imagens do *open pit* da mina, onde foram criados: vários taludes, formando a cava de uma mina a céu aberto; o britador primário, para o basculamento do minério; pilhas de minério ilustrando a armazenagem no pulmão próximo do britador; e o depósito de estéril. Ainda, foram elaboradas imagens dos equipamentos utilizados como recursos e das

entidades. Os equipamentos de transporte de minério representados foram: escavadeira, carregadeira e o caminhão fora de estrada. A Figuras 46 a, b, c e d mostram a modelagem final da carregadeira, escavadeira, caminhão fora de estrada vazio e caminhão fora da estrada cheio, respectivamente.

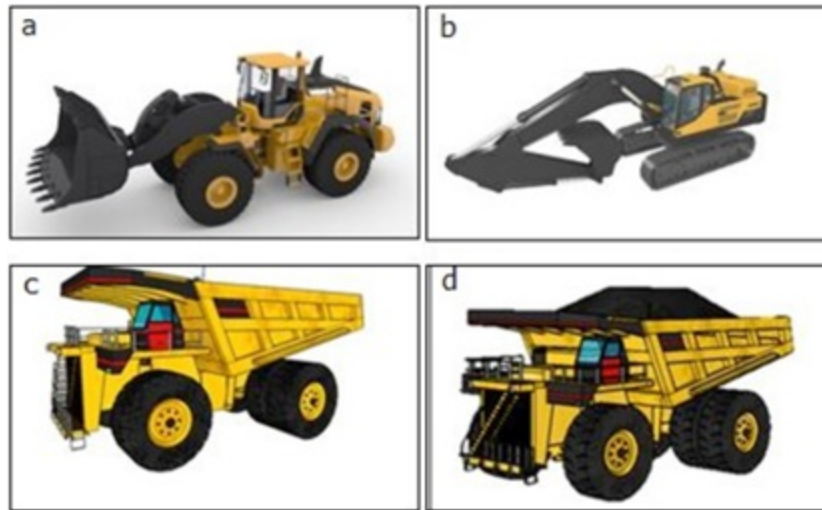


Figura 46. Imagens dos recursos. (a) Carregadeira. (b) Escavadeira. (c) Caminhão fora de estrada vazio. (d) Caminhão fora de estrada cheio

Fonte: Os autores.

Depois de finalizada a biblioteca gráfica, foi feita a construção do programa computacional. Iniciou-se a programação do modelo no software de simulação ProModel®, definindo os seguintes elementos: locais, entidades, redes de caminho, recursos, processamentos e lógicas de movimentação, e as lógicas de chegada. A Figura 47 representa a animação do modelo elaborado no referido simulador.

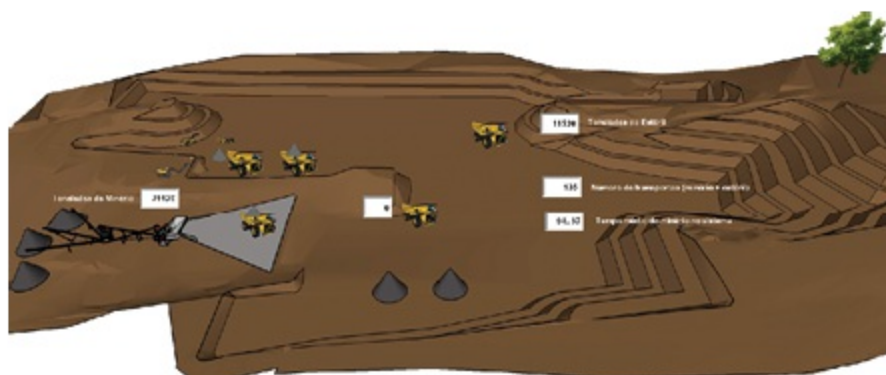


Figura 47. Modelo computacional elaborado no ProModel®

Fonte: Os autores.

Durante a verificação dos resultados da simulação, as medidas de desempenho analisadas foram: toneladas de minério, toneladas de estéril, número de transportes e tempo médio do minério no sistema.

Para a análise dos resultados obtidos com a simulação, foram realizadas 30 replicações com turnos de 8 horas cada. Já que os semi-intervalos de confiança (*half-width*) encontrados foram menores que 10% das médias amostrais, considera-se que o número de replicações utilizadas foi suficiente para uma boa precisão nos dados.

A Tabela 25 apresenta os resultados das medidas de desempenho analisadas no modelo elaborado, a saber: quantidade de minério (toneladas), quantidade de estéril (toneladas), número de transportes do caminhão fora de estrada, tempo médio do minério no sistema (minutos). Também, são mostrados os valores médios, máximos e mínimos, além do desvio padrão e do *half-width* de cada medida de desempenho analisada.

Medidas de desempenho	Média	Máximo	Mínimo	Desvio	Half-Width
Quantidade de minério (ton)	47.784	48.240	47.280	212,34	79,29
Quantidade de estéril (ton)	28.680	34.320	24.000	2.398,97	895,79

Nº de transportes do caminhão fora de estrada	318,20	344,00	298,00	10,16	3,79
Tempo médio do minério no sistema (min)	203,99	207,97	199,80	1,92	0,72

Tabela 25. Resultados das medidas de desempenho

Fonte: os autores.

A Tabela 26 apresenta os valores máximos, mínimos e médios obtidos referentes ao percentual de utilização de cada recurso, além do desvio padrão e do *half-width*. Os valores encontrados então, são referentes a duas escavadeiras, duas carregadeiras e sete caminhões fora de estrada.

Observa-se que a utilização das escavadeiras chegou a quase 100% de utilização, ou seja, a mesma quase não tinha tempo ocioso. Já as carregadeiras e os caminhões fora de estrada apresentaram, em média, pouca utilização, com cerca de 49,43% e 29,93% respectivamente.

Recursos / utilização	Média (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	Desvio Padrão	Half-width
Escavadeiras (R1)	99,97	99,97	99,97	0,00	0,00
Carregadeiras (R2)	49,43	49,77	48,97	0,20	0,08
Caminhões fora de estrada (R3)	29,93	31,29	28,29	0,80	0,30

Tabela 26. Percentual de utilização dos recursos

Fonte: Os autores.

Considerações finais

Houve a representação, no simulador, de um cenário hipotético de planejamento operacional, considerando aspectos práticos em minas a céu aberto, portanto, o objetivo almejado foi atingido. Por meio do modelo elaborado, foi possível um melhor entendimento de todo o funcionamento do

processo de retirada de minério, ou seja, desde sua escavação até o transporte do minério de interesse para seu processamento. Neste processo, as medidas de desempenho analisadas foram quantidade de minério (toneladas), quantidade de estéril (toneladas), número de transportes do caminhão fora de estrada, tempo médio do minério no sistema (minutos) e percentual de utilização dos recursos.

Depois de analisados os relatórios que contêm as medidas de desempenho, percebeu-se que alguns recursos estão com bastante tempo ocioso, enquanto outros estão com praticamente 100% de utilização. Em pesquisa futura, a quantidade de recursos alocados na frente de lavra será otimizada, considerando o cenário simulado.

Este artigo contribui para uma melhor compreensão da importância do planejamento operacional na mineração, bem como do processo de programação computacional do modelo em um simulador. A simulação, como informação adicional, vem sendo cada vez mais utilizada no Brasil em empresas dos mais diversos segmentos de atuação, mostrando o seu benéfico potencial como ferramenta gerencial. Também, considerando aspectos práticos, salienta-se que com um melhor gerenciamento dos recursos, pode haver a redução nos custos de operação, além melhoria da eficiência do processo.

Sugere-se, para pesquisas futuras, a análise de novas medidas de desempenho, de forma a melhorar a análise frente ao processo de retirada do minério, além da otimização dos recursos já analisados. Ademais, propõe-se a elaboração de um cenário em alguma mineradora presente na região sudeste de Goiás, a fim de realizar análises comparativas com a situação real de uma empresa.

Agradecimentos

Os autores do artigo gostariam de agradecer ao CNPq pela bolsa concedida pelo Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFG/CNPq).

Referências

- ARAÚJO, Francisco César R. de. **Planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões**: abordagens exata e heurística. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- ARTEAGA, Felipe; NEHRING, Micah; KNIGHTS, Peter. The equipment utilization versus mining rate trade-off in open pit mining. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 40, p. 1-24, 2017.
- ATAEPOUR M.; BAAFI E. Y. ARENA Simulation Model for Truck-Shovel Operation in Dispatching and Non-Dispatching Modes. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, p. 125-129, 1999.
- BERTO, Rosa Maria V. S.; NAKANO, Davi Noboru. A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento dos métodos e tipos de pesquisa. **Produção**, v. 9, n. 2, p. 65-75, jul. 2000.
- _____. Metodologia da pesquisa e a engenharia de produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18., 1998, Niterói. **Anais...** Niterói: ABEPRO, 1998.
- BRANCO, Najmat Celene N. M. **Planejamento Operacional de Lavra de Minério de Ferro no Estado do Pará**: Proposta de Simulação-Otimização de Recursos Logísticos na Etapa Mina. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BRYMAN, Alan. **Research methods and organization studies**. London: Uniwin Hyman, 1989.
- CARVALHO, Maria Cecília M. A construção do saber científico: algumas proposições. In: _____. (org.). **Construindo o saber**. 2. ed. Campinas: Papirus, 2000, p. 63-86.

- CASTRO NETO, Laherce Ribeiro de. **Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro**. 2006. 191 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- COSTA, Felipe Pereira. **Aplicações de Técnicas de Otimização a Problemas de Planejamento Operacional de Lavra em Minas a Céu Aberto**. 2005. 140 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- DINDARLOO, S. R.; OSANLOO, M.; FRIMPONG, S. A Stochastic Simulation Framework for Truck and Shovel Selection and Sizing in Open Pit Mines. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 115, n. 3, p. 209-219, 2015.
- ESKANDARI, Hamidreza; DARABI, Hadi; HOSSEINZADEH, Seyed Amirhamed. Simulation and optimization of haulage system of an open-pit mine. **Simulation Series**, v. 45, n. 11, p. 203-210, 2013.
- FORSMAN, B.; RONNKVIST, E.; VAGENAS N. Truck Dispatching Computer Simulation In Aitik Open Pit Mine. **Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 7, p. 117-120, 1993.
- FREITAS FILHO, Paulo Jose de. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- GOODFELLOW, Ryan C. Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty. **Applied Soft Computing Journal**, v. 40, p. 292-304, 2016.
- GUIMARÃES, Irce Fernandes G.; SOUZA, Marccone Jamilson F.; PANTUZA JÚNIOR, Guido. Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 14., 2007, Bauru. **Anais...** Bauru: UNESP, 2007.
- HASHEMI, Ali Saadatmand; SATTARVAND, Javad. Simulation based investigation of different fleet management paradigms in open pit mines - a case study of Sungun Copper Mine. **Archives of Mining Sciences**, v. 60, n. 1, p. 195-208, 2015.
- KELTON, W. David; SADOWSKI, Randall P.; SADOWSKI, Deborah A. **Simulation with Arena**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- KOLONJA, B.; MUTMANSKY, J. M. Analysis Of Truck Dispatching Strategies For Surface Mining Operations Using SIMAN. In: SME

- ANNUAL MEETING, 1995, Colorado. **Proceedings...** Colorado: SME, 1995.
- LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- _____. et al. Elaboração de modelos conceituais em simulação computacional através de adaptações na técnica idef0: uma aplicação prática. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABEPRO, 2007.
- _____. ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40., 2008, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBPO, 2008.
- LOPES, Marcos. **O que é mineração**. 2014. Disponível em: <<http://bit.ly/2Nacoi>>. Acesso em: 08 ago. 2016.
- MACÊDO, Alexandre José B.; BAZANTE, Arlindo José. BONATES, Eduardo Jorge L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 54, n. 3, 2001.
- PANTUZA JÚNIOR, Guido. **A Utilização de Ferramentas da Pesquisa Operacional Aplicadas ao Planejamento de Lavra em Minas a Céu Aberto**. 2008. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- _____. **Métodos de Otimização Multiobjetivo e de Simulação Aplicados ao Problema de Planejamento Operacional de Lavra em Minas a Céu Aberto**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- RIBEIRO, Cesar Monteiro. **Modelagem e Simulação de Sistemas a Eventos Discretos Via Redes de Petri Estocásticas: Aplicação Em Mineração**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SOUMIS, F.; ETHIER, J.; ELBROND, J. Truck dispatching in an open pit

mine. **Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 3, p. 115-119, 1989.

Notas

29. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: brenergaz@gmail.com. Bolsista do programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFG/CNPq).

30. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Bolsista do programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFG/CNPq). Contato: anaclarabicalho@yahoo.com.br.

31. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

32. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Biotecnologia. Contato: dalton_tavares@ufg.br.

Classificação de danos em uma viga a partir de assinaturas de impedância eletromecânica

*Bruno Pereira Barella*³³

*Stanley Washington Ferreira de Rezende*³⁴

*João Paulo Moreira Bento*³⁵

*José dos Reis Vieira de Moura Júnior*³⁶

Resumo: O método de impedância eletromecânica o qual identifica a presença de danos em uma dada estrutura é uma ferramenta promissora. Usualmente, tal ferramenta utiliza um transdutor piezoelétrico como sensor e atuador, afim de excitar e colher a resposta dinâmica de estruturas mecânicas, com o interesse de avaliar sua integridade. O objetivo principal deste trabalho foi de classificar os danos aplicados a uma viga de alumínio, utilizando o modelo de rede neural artificial de Hopfield aplicado ao reconhecimento de padrões. Para tanto, utilizou-se como padrões, imagens de assinaturas de impedâncias eletromecânicas obtidas da estrutura em estudo. Neste sistema mecânico foram introduzidos três níveis de dano e então foi desenvolvido um código em ambiente Matlab para a realização do treinamento da rede e de sua avaliação. Como resultado foi possível classificar todos os níveis de danos propostos, obtidos pela rede, por meio da distância de Hamming em relação as assinaturas treinadas.

Palavras-chave: Hopfield, Reconhecimento de padrão, Assinatura de Impedância Eletromecânica.

Introdução

O monitoramento de integridade estrutural tem como principal objetivo avaliar continuamente estado de saúde dos sistemas mecânicos ao longo de sua vida útil. A falta ou a não realização de manutenção pode acarretar em grandes prejuízos. Na aeronáutica pode-se citar o acidente do voo Aloha Airlines 243, ocorrido no dia 28 de abril de 1988, um Boeing 737-297 que servia a linha sofreu uma descompressão explosiva em pleno voo, mas foi capaz de pousar em segurança. Neste acidente houve uma fatalidade, uma aeromoça foi arremessada para fora da aeronave. A Figura 48 apresenta a fuselagem da aeronave com o casco fraturado (Afshari, 2012; Hendricks, 1991).

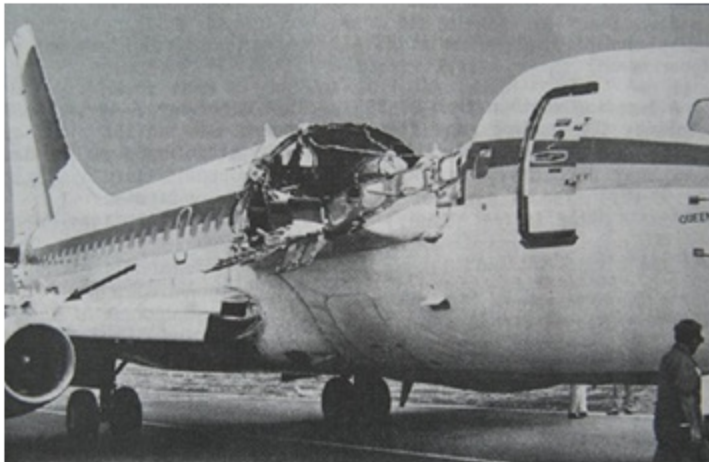


Figura 48. Fuselagem do Boeing após a aterrissagem

Fonte: Retirado de Hendricks (1991).

Dentre as inúmeras técnicas para identificação e monitoramento de danos estruturais têm-se como as principais: técnica de impedância eletromecânica, técnica das ondas de Lamb, testes radiográficos, ensaios por ultrassom, líquidos penetrantes, medições de propriedades dinâmicas e partículas magnéticas (Bray & McBride, 1992; Palomino, 2008; Tsuruta, 2008; Moura Júnior, 2008; Leucas, 2009).

A respeito da técnica de impedância eletromecânica, um dos principais objetivos é de não produzir nenhuma mudança significativa na estrutura em estudo, mantendo após a realização do ensaio, as mesmas características que a estrutura apresentava anteriormente, ou seja, realizando um ensaio não destrutivo (END).

Neste contexto, observa-se a evolução dos métodos da manutenção preditiva, que é aplicada em indústrias, em construções, no monitoramento de máquinas, entre outros (Furtado, 2004). Sua utilização se justifica principalmente com as vantagens econômicas adicionais se o sistema de monitoramento da integridade estrutural puder evitar com segurança a desmontagem desnecessária de componentes estruturais e com a necessidade de reduzir gastos e aumentar a confiabilidade e segurança das estruturas e equipamentos (Farrar & Worden, 2012).

Uma grande vantagem do emprego da análise de integridade estrutural (SHM, *Structure Health Monitoring*) é a redução de custos relacionado a substituição prematura de equipamento, confiabilidade dos sistemas e aumento da segurança. É importante a localização de danos pois com isto é possível acelerar o processo de manutenção e avaliar se a substituição é realmente necessária.

Dentre as diversas técnicas de SHM existentes, este trabalho utiliza o método baseado em impedância eletromecânica, devido este ser um procedimento não destrutivo e que utilizar sensores piezoelétricos como sensor/atuador (Moura Júnior, 2008).

As técnicas de rede neurais artificiais têm grande aplicabilidade em problemas de identificação de danos devido a sua capacidade de reconhecer padrões e adaptabilidade em sistemas complexos de detecção de danos (Heravi et al., 2016). Desta forma foi utilizado o modelo neural de Hopfield para classificar 4 níveis de danos a partir das imagens das assinaturas de impedância.

1. Impedância eletromecânica

A técnica de impedância eletromecânica a princípio foi abordada por (Liang et al., 1997). O conceito básico desta técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos. Como a medição direta da impedância mecânica da estrutura é uma tarefa complicada, o método utiliza materiais piezoelétricos colados ou incorporados à estrutura, permitindo medir a impedância elétrica. Esta se relaciona com a impedância mecânica da estrutura, que é afetada pela presença do dano.

Uma oscilação mecânica é induzida no sistema a ser monitorado por meio de transdutores piezoelétricos, simultaneamente a impedância elétrica é mensurada e então é obtida uma assinatura de impedância, a qual abstrai as principais características mecânicas do sistema monitorado, como rigidez, amortecimento e massa. Um dano é uma alteração adversa causada na estrutura, que afeta seu desempenho presente ou futuro (Freitas, 2016). Estes danos correspondem em alterações nas características mecânicas do sistema, como rigidez, amortecimento e massa. Desta forma é possível constatar a presença incipiente de um dano estrutural por meio do método baseado em impedância eletromecânica.

A impedância eletromecânica pode ser expressa em função da tensão aplicada na pastilha PZT e da corrente resultante obtida devido à resposta dinâmica do sistema.

A equação da admitância que relaciona a impedância elétrica dada pela pastilha, com a impedância mecânica da estrutura é apresentada pela Equação 1 (Liang et al., 1997).

$$Y(\omega) = i\omega a(\varepsilon_{33}^{-T}(1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) - Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{xx}^E) \quad (1)$$

onde: $Y(\omega)$ admitância elétrica, $Z_a(\omega)$ Impedância mecânica da pastilha PZT, $Z_s(\omega)$ Impedância mecânica da estrutura, $\hat{Y}_{xx}^E$ Módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico 0, d_{3x}^2 Constante de acoplamento do PZT na direção x a deformação 0, ϵ^{-T}_{33} Constante dielétrica a deformação 0, δ Constante dielétrica do PZT, α Geometria constante do PZT.

Para um aumento da sensibilidade, a técnica utiliza uma banda de frequência alta, de 30KHz a 200kHz (Moura Júnior, 2008). As regiões onde se encontram a maior quantidade de picos (ressonâncias) são consideradas ideais para a aplicação da técnica, uma vez que estas se alteram facilmente com a presença de um dano. A fim de localizar a melhor região a ser monitorada, métodos estatísticos ou de otimização são empregados (Moura Júnior et al., 2004, Bento et al., 2016).

Após a localização da melhor região de análise, colhem-se as assinaturas de impedância. Para uma análise qualitativa plota-se as assinaturas referentes a estrutura danosa e integra. Já para uma análise quantitativa utiliza a métrica de dano RMSD, descrita pela Equação (2).

$$RMSD = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[Re_{i,1} - Re_{i,2}]^2}{[Re_{i,1}]^2}} \quad (2)$$

onde: $Re_{i,1}$ representa o sinal medido da estrutura integra, $Re_{i,2}$ representa o sinal medido da estrutura danosa para a frequência i , e n representa a quantidade de pontos frequenciais avaliados. Quanto maior o valor de RMSD, maior é a diferença entre os sinais da estrutura integra e danosa (Moura Júnior, 2008).

De posse das assinaturas de impedância eletromecânica obtidas a partir de 4 níveis de danos diferentes, pode-se converter estas em imagens e então realizar o treinamento do modelo neural de Hopfield. Em seguida colheu-se

outras 4 assinaturas para realizar a classificação e identificação do local do dano.

2. Modelo neural de Hopfield

O modelo de Hopfield é uma rede neural recorrente dinâmica que é biologicamente plausível, pois funciona muito como o cérebro humano. Ela é formada por uma única camada completamente conectada, ou seja, cada neurônio que constitui a camada está conectado a todos os outros neurônios por conexões com pesos como mostrado na Figura 49 (Hopfield, 1982; Haykin, 2001).

Este modelo tem como característica possuir memória auto associativa com habilidade de armazenar e recuperar um conjunto de padrões.

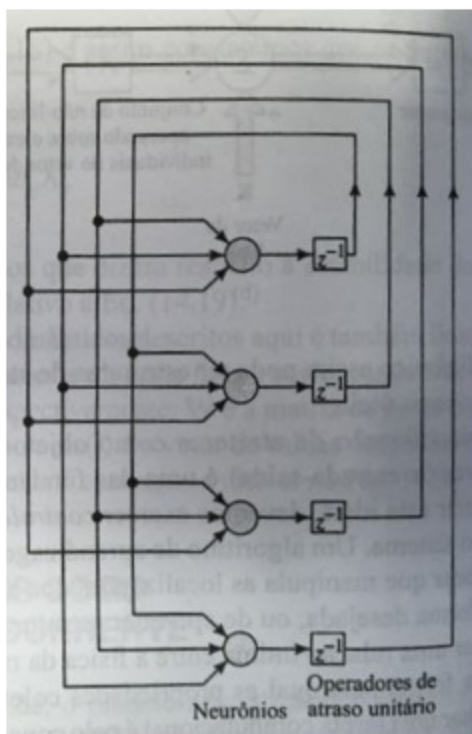


Figura 49. Grafo arquitetural de uma rede de Hopfield consistindo de 4 neurônios

Fonte: Retirado de Haykin (2001).

A saída de cada neurônio é calculada aplicando-se a função de ativação, isto é, a soma ponderada de suas entradas. Os pesos de cada entrada são calculados na fase de treinamento da rede, a fim de se obter a solução do problema de mapeamento.

Para se realizar o treinamento de uma rede de Hopfield deve-se encontrar uma matriz de pesos que permita a convergência dos dados de entrada para um padrão conhecido. De posse dos padrões binarizados a serem treinados, a rede pode então realizar o cálculo dos pesos utilizando a Equação 3 (Paik, 1992; Haykin, 2001).

$$W_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^N (x_{ki} - 1)(x_{kj} - 1) & \text{se } i \neq j \\ 0 & \text{se } i = j \end{cases} \quad (3)$$

Nesta fórmula, w_{ij} é a matriz de peso de ligação da unidade j para a unidade i e x_i pode assumir -1 ou +1, é o i -ésimo elemento do padrão x .

Em seguida a rede então já poderá receber algum elemento a ser classificado, onde y_j é a saída da unidade j em determinado instante e x_i é o elemento i do padrão de entrada. Deve-se iterar as Equações 4 e 5 até a saída y_j permanecer constante ou constatar uma convergência para um valor de energia mínima, a qual representa então o padrão que melhor se aproxima do padrão desconhecido (Paik, 1992; Haykin, 2001).

$$y_j = T\left(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i\right), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

$$T(x) = \begin{cases} -1 & , \text{se } x < 0 \\ 1 & , \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (5)$$

A cada iteração a energia do sistema diminuirá assim garantindo a convergência para um ponto fixo denominado atrator. A Equação 6 apresenta a função de energia a ser minimizada durante as iterações.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j \quad (6)$$

Esse valor é chamado de “energia” porque a definição garante que, quando os pontos são escolhidos aleatoriamente para atualizar, a energia E diminuirá ou permanecerá igual (Paik, 1992; Haykin, 2001).

3. Procedimento experimental

Por meio da placa EVAL AD5933-EBZ da empresa *Analog Devices* (Devices, 2007), foram colhidas 8 assinaturas de impedância referentes a uma viga de alumínio com as dimensões 400x25x3 mm, a qual representou um sistema mecânico simples. A Figura 50 apresenta a placa de aquisição de sinais utilizada.

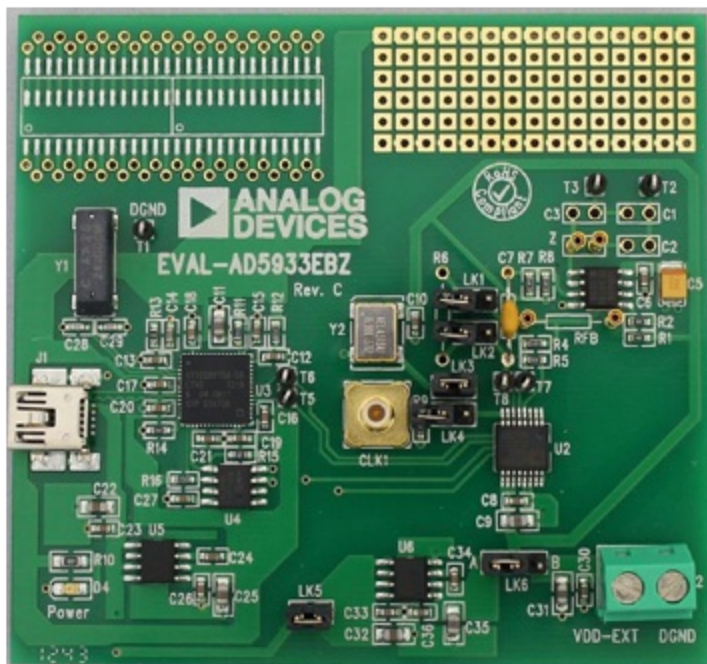


Figura 50. Placa de aquisição de sinais

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na viga de alumínio, foram inseridos três níveis de dano por meio de uma adição de massa, em seguida um deslocamento da mesma para simular um aumento da avaria. Então se obteve as seguintes quantidades de assinaturas: duas assinaturas para o sistema inteiro, duas assinaturas com o dano de 5 cm, duas assinaturas com o dano de 10 cm e duas assinaturas com o dano de 15 cm, totalizando assim oito assinaturas. A distância utilizada para referenciar o dano representa o quão próximo a massa, empregada como dano, esteve da extremidade oposta ao PZT. Ou seja, dano de 5 cm é a posição da massa mais distante da pastilha piezoelétrica (menor dano). A Figura 51 apresenta as assinaturas dos três níveis de dano proposto e o baseline (sem dano).

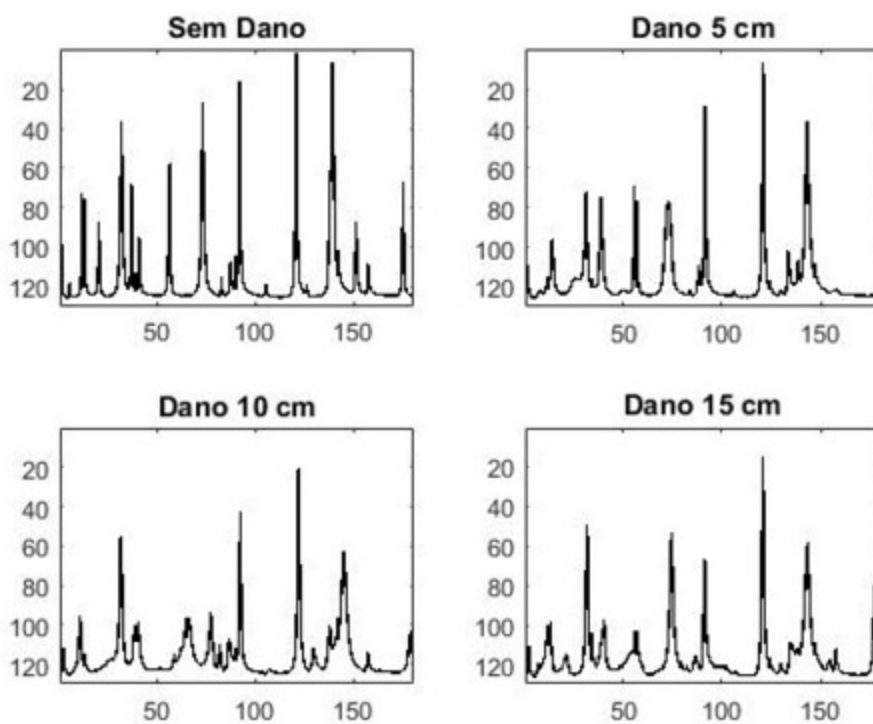


Figura 51. Assinaturas de impedância utilizadas na construção da matriz de pesos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Estas assinaturas foram convertidas para matrizes binárias e então utilizadas para realizar o treinamento da rede.

4. Discussão e resultados

Para o treinamento da rede foi utilizado uma assinatura de impedância de cada nível de dano. A segunda assinatura foi utilizada para a verificação do treinamento. A Figura 52 apresenta os quatro resultados, onde a primeira coluna de imagens representa a assinatura utilizada no treinamento, a segunda coluna representa a assinatura avaliada pela rede e a terceira coluna a resposta da rede.

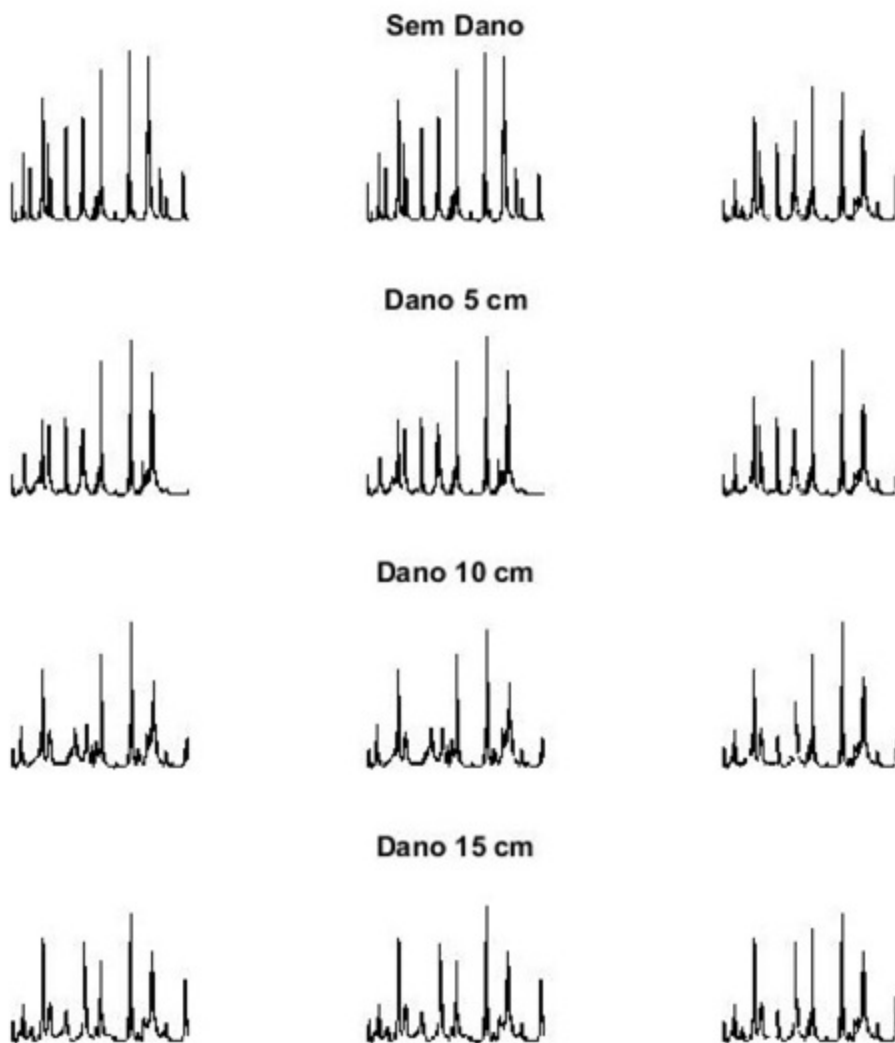


Figura 52. Resposta da rede de Hopfield

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se observar que a rede se aproximou do resultado ótimo na avaliação dos sinais.

Em seguida aplicou-se a distância de Hamming comparando os padrões utilizados na construção da matriz de pesos e as respostas da rede, afim de determinar com qual padrão mais se aproxima as respostas da rede. A Figura 53 apresenta as distâncias de Hamming obtidas, onde estas são agrupadas de 4 em 4, pois comparou-se cada resposta com todos os padrões de entrada.

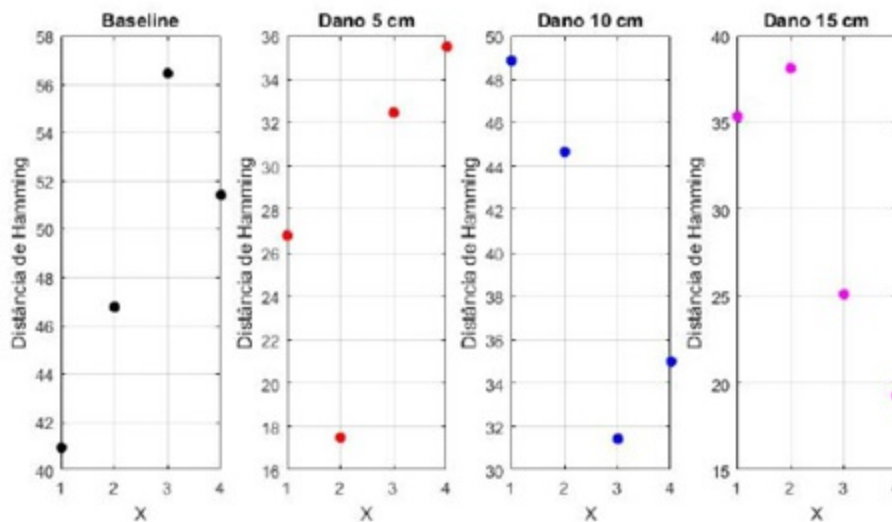


Figura 53. Avaliação dos resultados pela distância de Hamming

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como pode-se observar a rede convergiu para um mínimo local, identificando todas as assinaturas.

Conclusões ou considerações finais

O emprego desta técnica propicia a caracterização de danos em determinados sistemas mecânicos, assim pode-se reduzir o tempo para realização de manutenções, agindo diretamente no local do problema. Um

outro fator impactante do emprego da rede de Hopfield na análise de integridade estrutural é a possibilidade de desenvolvimento de sistemas inteligentes que possam agir imediatamente após a identificação do problema.

Muito ainda pode se avançar pois a rede necessita de ajustes para atingir o resultado ótimo. A não convergência para o ponto ótimo se dá devido ao valor aleatório utilizado como energia mínima. Porém mesmo sem este valor a rede apresentou bons resultados identificando todos os padrões que lhe foram propostos.

Desta forma o emprego da rede de Hopfield é viável para a caracterização de dano em determinado sistema mecânico.

Referências

- AFSHARI, Mana. **Vibration-and Impedance-based Structural Health Monitoring Applications and Thermal Effects**. 2012. 160f. Tese (Doutorado) – University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree, Blacksburg.
- BAPTISTA, Fabrício Guimarães; et al. **Análise experimental de diafragmas piezelétricos comerciais para detecção de dano estrutural baseada na impedância eletromecânica**. 2016. 70f. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo.
- BENTO, J. P. M. ; BARELLA, B. P. ; MOURA JR, J. R. V. Utilização do Algoritmo de Colônia de Abelhas na Otimização de Faixas de Frequência para o Monitoramento Estrutural Baseado em Impedância. In: V Workshop de Álgebra, 2016, Catalão, **Anais...**, Catalão: Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, 2016.
- BRAY, Don E.; McBRIDE, Don. Nondestructive testing techniques. **NASA STI/Recon Technical Report A**, v. 93, 1992.
- DEVICES, Analog. **AD5933 Datasheet**. Disponível em: <<http://bit.ly/2NApOUg>>. Acesso em: 30 jun. 2009, 2007.
- FARRAR, Charles R.; WORDEN, Keith. **Structural health monitoring: a machine learning perspective**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

- FURTADO, Rogério Mendonça. **Identificação de falhas estruturais usando sensores e atuadores piezelétricos e redes neurais artificiais**. 2004. 152 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004.
- HAYKIN, Simon. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2001.
- HENDRICKS, William R. The Aloha Airlines accident: a new era for aging aircraft. In: **Structural integrity of aging airplanes**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991, p. 153-165.
- HOPFIELD, John J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 79, n. 8, p. 2554-2558, 1982.
- HERAVI, Omid Entezari; GHALEHNOVI, Mansour; ENTEZAMI, Alireza. Application of Hopfield neural network to structural health monitoring. In: **6th International Conference on Acoustics & Vibration (ISAV2016)**. 2016.
- LEUCAS, Leonardo de Freitas. **Utilização das Técnicas de Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebites**. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- LIANG, Chen; SUN, Fanping P.; ROGERS, Craig. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of intelligent material systems and structures**, v. 8, n. 4, p. 335-343, 1997.
- MOURA JÚNIOR, José dos Reis Vieira. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 2008. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- MOURA JÚNIOR, Jose dos Reis V.; et al. Impedance-based health monitoring: frequency band evaluation. **Smart Structures and Systems**, v. 7, n. 1, 2011, p. 15-25 2004.
- PAIK, Joon Ki; KATSAGGELOS, Aggelos K. Image restoration using a modified Hopfield network. **IEEE Transactions on image processing**, v. 1, n. 1, p. 49-63, 1992.
- PALOMINO, Lizeth Vargas. **Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de**

integridade estrutural. 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RABELO, Diogo de Souza; et al. Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024–T3 aluminum panels under varying temperature. **Struct. Health Monit**, v. 1, n. 1, p. 1-17, 2016.

TSURUTA, Karina Mayumi. **Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica.** 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Notas

33. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: brunobarella@hotmail.com.

34. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: stanley-washington@hotmail.com.

35. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: joapaulo.moreira.bento@gmail.com.

36. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: zereis@ufg.com.

Classificação de danos em uma viga de alumínio utilizando-se a técnica de mapas auto-organizáveis de kohonen em assinaturas de impedância eletromecânica

*Stanley Washington Ferreira de Rezende*³⁷

*Bruno Pereira Barella*³⁸

*João Paulo Moreira Bento*³⁹

*José dos Reis Vieira de Moura Junior*⁴⁰

Resumo: A crescente necessidade de análises robustas e ao mesmo tempo eficientes, de extensos conjuntos de dados tem propiciado a aplicação de métodos matemáticos que sejam capazes de reconhecer inteligentemente informações vitais à tomada de decisões. Neste contexto, as redes neurais artificiais têm ganhado maior destaque na classificação de conjunto e no mapeamento de dados, fornecendo resultados eficazes que justificam a sua aplicabilidade. No presente trabalho, empregou-se a rede neural de mapas auto-organizáveis (SOM) na categorização de um conjunto de dados de impedância eletromecânica de forma a permitir o reconhecimento de padrões de danos em uma viga de alumínio, cujos resultados evidenciam a grande eficiência da rede no âmbito da análise de integridade estrutural.

Palavras-chave: Redes Neurais Artificiais. Self-Organizing Map. Impedância Eletromecânica. SHM.

Introdução

O diagnóstico de dados experimentais tem se tornado um dos campos de maior preocupação em termos de pesquisa científica da atualidade, o que proporcionou o desenvolvimento de novas tecnologias neste âmbito (Moura Júnior, 2008).

Tal acontecimento é decorrente do fato de que em uma série de dados, quer seja ela numerosa ou escassa, a percepção aparente de informação nem sempre é imediata, necessitando-se assim a aplicação de sistemas e/ou técnicas que interpretem de forma inteligente os padrões existentes e que possuam potencial relevância na tomada de decisão (Baptista, 2010; Sepehry, 2011).

Assim, o sucesso resultante das decisões adotadas se encontra diretamente interligadas a escolha estratégica da técnica de análise e da tecnologia disponível no processo de avaliação.

Neste contexto, as metodologias de inteligência artificial (IA), com enfoque naquelas baseadas nas chamadas redes neurais artificiais (RNA's), demonstraram-se de grande aplicabilidade nas últimas décadas, principalmente pela capacidade de repetição exaustiva de tarefas associadas à variação dos parâmetros de investigação (Leucas, 2009).

Em meio a gama das RNA's, o método fundamentado nos mapas auto-organizáveis (*Self-organizing map*, SOM) estabelecido por Teuvo Kohonen em 1981, tem sido empregado a variados projetos de engenharia, por permitir o agrupamento (*clustering*), a classificação e predição de dados multidimensionais em âmbitos dimensionais, ao mesmo tempo possibilitando a identificação de correlações entre múltiplas variáveis (Bullinaria, 2004a).

Esta contribuição teve como objetivo apresentar um método de classificação de falhas a partir de sinais de impedância eletromecânica colhidos de uma estrutura simples em suas duas condições, com dano e sem o dano. Fazendo-se para isso o emprego da rede neural SOM, implementada no pacote Neural Network Toolbox do software interativo Matlab.

Os resultados encontrados evidenciam a capacidade de aplicação desta rede na classificação de danos estruturais, tornando-se assim factível a sua utilização no âmbito do monitoramento da integridade estrutural, definido na literatura com Structural Health Monitoring (SHM), por possibilitar o agrupamento dos conjuntos de dados de modo a integralizar o método com técnicas de quantificação e localização do dano.

Som-Rede Neural Competitiva

Assim como as demais técnicas de RNA's presentes na literatura, os mapas auto-organizáveis de Kohonen foram inicialmente inspirados no funcionamento do córtex cerebral humano, em que a partir de um conjunto de entradas (*sinapses*) apresentadas ao modelo (rede) é gerada uma ou mais saídas (respostas), as quais correspondem a representações bidimensionais (mapas) do banco de dados utilizados.

Além disso, outro fator de grande impacto na utilização de redes neurais SOM é que o treinamento dessas se caracteriza por ser não supervisionado, em que a própria rede passa a formar seus critérios de classificação sem ajuda externa, ou seja, sem que haja a implementação de *targets* para cálculo dos pesos sensoriais (Bullinaria, 2004b).

Contudo, para que isso possa ser realizado deve-se assumir que a associação entre os padrões de entradas avaliados é amplamente definida em termos de linearidade (Inman, 2005), e que a própria rede será capaz de identificar tal característica.

Ademais, umas das peculiaridades do método de treinamento não supervisionado, e que também é empregado pelas redes SOM, é o modo de aprendizagem competitivo, no qual os neurônios de saídas de cada camada competem individualmente entre si a fim de serem ativados pela função de transferência, sendo que em cada iteração apenas um neurônio, o chamado *Best Matching Unit* (BMU), será ativado (Affonso, 2011).

A competitividade entre os neurônios de cada camada é responsável pelo agrupamento destes, sendo que a disposição resultante é apresentada em gráficos reticulados (*lattice*); o que justifica a nomeação do método por mapas auto-organizáveis.

O processo de escolha do BMU é fundamentado no critério da menor distância euclidiana entre o vetor de pesos da iteração j e o vetor de entradas da rede, conforme a Eq. (1):

$$BMU_j(x) = \operatorname{argmin} \|x - w_i\| \quad (1)$$

onde $BMU_j(x)$ representa o neurônio de melhor resposta ao padrão de entrada x e w_i é o vetor de pesos armazenados. Uma variação da Eq. 1 e que também comumente é empregado em algoritmos de SOM é expresso matematicamente na Eq. (2):

$$D_e = \sqrt{(x_1 - w_1)^2 + (x_2 - w_2)^2 + \dots + (x_n - w_n)^2} \quad (2)$$

onde D_e representa a distância euclidiana entre o vetor de entrada e o vetor de pesos.

A cada época do processo de treinamento, a atualização dos BMU_j resulta na minimização da distância de sua vizinhança topológica, identificando-se assim uma etapa de reconhecimento adaptativa dos padrões de entrada. Contudo, este processo de adaptação dependerá da forma de interligação entre os múltiplos neurônios da rede, os principais tipos de conexão utilizados na literatura podem ser visualizados na Figura 54.



Figura 54. Representação gráfica dos diferentes tipos de topologia de mapas auto-organizáveis presentes na literatura

Fonte: Elaborado pelos autores.

Neste estudo, adotou-se a ligação triangular entre múltiplos neurônios da rede, uma vez que esta topologia melhor se configura em relação aos sinais de impedância eletromecânica.

Configuração experimental

O processo experimental adotado neste trabalho teve por finalidade classificar os diferentes tipos de dano impostos a uma viga de alumínio, de dimensões 300x25x3 mm. O dano simulado artificialmente se baseou na adição de massa ao sistema em 5 posições distintas, sendo que para o caso em estudo, esta massa foi expressa por um ímã de dimensões 10x10x10 mm acoplado mecanicamente a viga.

As localizações adotadas para delimitação do dano artificial na viga podem ser visualizadas a partir da Figura 55, sendo que para cada caso a coleta de dados se estabeleceu de modo individual.

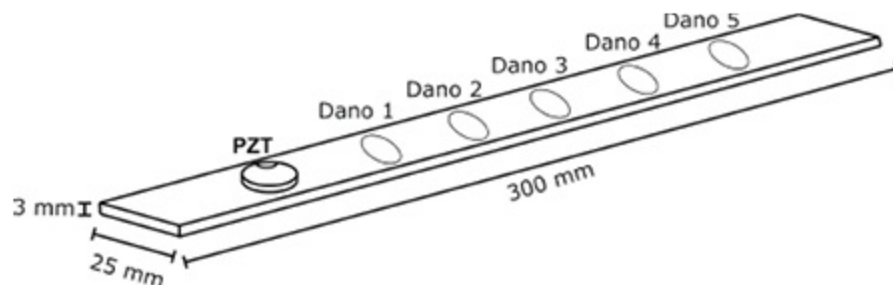


Figura 55. Representação gráfica da viga utilizada como corpo de prova no procedimento experimental, com o posicionamento da pastilha PZT (50 mm em relação à extremidade da viga) e a localização de cada dano aplicado individualmente, Dano 1 (50 mm em relação ao PZT), Dano 2 (100 mm em relação ao PZT), Dano 3 (150 mm em relação ao PZT), Dano 4 (200 mm em relação ao PZT) e Dano 5 (250 mm em relação ao PZT)

Fonte: Elaborado pelos autores.

O sistema de aquisição das assinaturas impedância eletromecânica foi composto por uma placa de monitoramento EVAL-AD5933EBZ fabricada pela empresa *Analog Devices*, sendo que, com a finalidade de se verificar a funcionalidade da placa na coleta de assinaturas, realizou-se a calibragem do sistema com um capacitor de cerâmica de 100 nF acoplado em paralelo com uma resistência de 300 Ω , visto que estes foram ligados entre os pinos da placa RFB, esta pode ser visualizados na Figura 56.

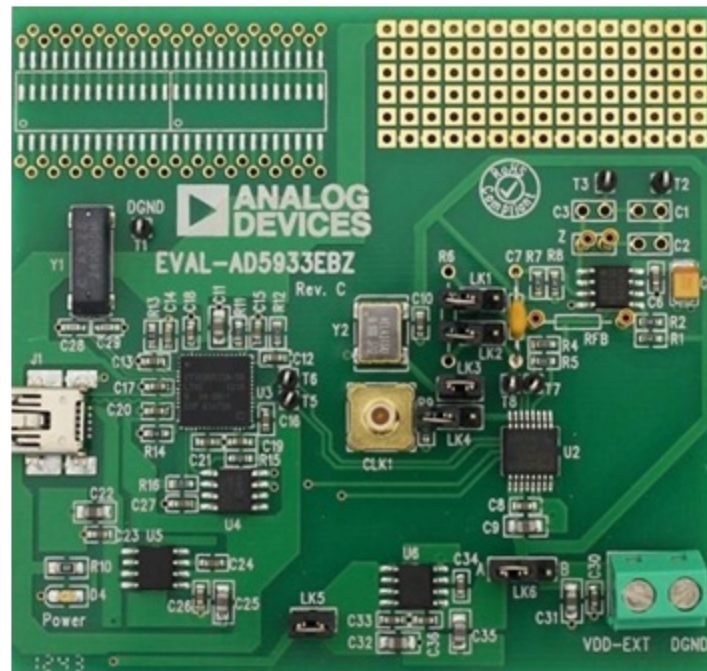


Figura 56. Placa de aquisição das assinaturas de impedância eletromecânica utilizada no procedimento experimental

Fonte: Elaborado pelos autores.

O transdutor piezoelétrico utilizado tanto como atuador quanto como sensor no procedimento, trata-se de uma pastilha PZT de 20 mm de diâmetro por 3 mm de espessura (Bittencourt, 2004; Gallego-Juárez, 1989). As configurações utilizadas na placa se basearam em um range de frequência de 27 a 32 kHz com uma amostragem de 511 pontos.

Utilizou-se apenas da parte real da impedância eletromecânica no processo de treinamento e simulação da rede neural, em vista do que a parte imaginária é mais sensível a variações de temperatura que podem provocar alterações no processo de aprendizado da rede (Bastani, 2012; Raju, 1997).

Simulação experimental

Definida a topologia a ser utilizada bem como as configurações de aquisição, realizou-se a coleta de 5 amostras de sinais de impedância eletromecânica para cada conjunto de estados da viga, totalizando-se assim em uma população de 30 sinais. As médias de cada grupo de sinais podem ser visualizadas na Figura 57.

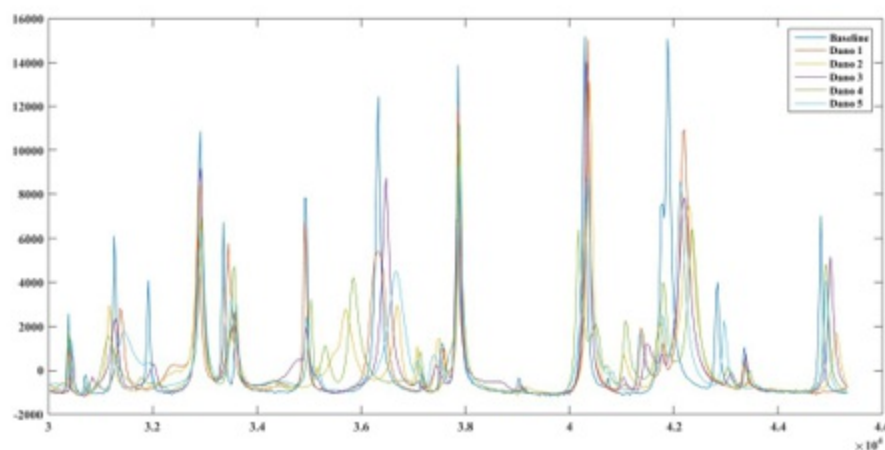


Figura 57. Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica, dada as 6 condições iniciais

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se perceber que os padrões adotados para cada grupo permitem a linear identificação de características entre estes, assim possibilitando a aplicação da rede para identificação e classificação (Park, 2005; Park, 2006).

A topologia adotada na construção da rede SOM trata-se de uma transformação não linear do espaço multidimensional em um espaço bidimensional de dimensões 10x20 neurônios, com 200 sinapses de saída,

sendo que inicialmente foram utilizados para o processo de treinamento 18 padrões de entradas referentes as condições estabelecidas. A Figura 58 ilustra a topologia da rede utilizada.

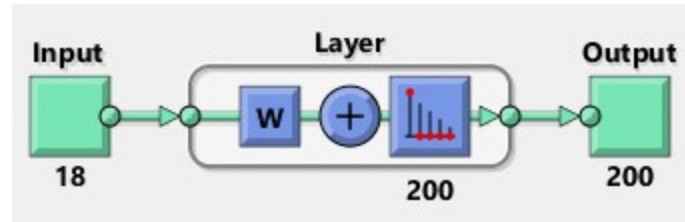


Figura 58. Representação gráfica da topologia adotada na rede SOM utilizada

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para realização do processo de treinamento da rede, os padrões de entrada foram apresentados 200 vezes ao modelo, que passou a ponderar cada peso entre os múltiplos neurônios da vizinhança, ou seja, foram utilizadas 200 épocas no procedimento de aprendizagem da rede.

Com a rede treinada e os pesos de cada conexão já ponderados, foram utilizados 2 padrões de entradas de cada condição para simulação e validação do modelo, totalizando assim 18 padrões para treinamento e 12 padrões para validação. Os resultados obtidos evidenciaram que a metodologia proposta consegue distinguir com eficiência os conjuntos apresentados.

Resultados e discussões

Os mapas auto-organizáveis obtidos como resultados pelo modelo evidenciaram que o método proposto de identificação de falhas por redes neurais SOM conseguiu classificar com eficiência os diferentes tipos de estados da viga, com dano e sem o dano, conforme a Figura 59.

Os resultados gráficos oriundos dos padrões de validação são expressos na figura pelos mapas 2 e 4 para o baseline, 7 e 9 para a condição de dano 1, 12 e 14 para a condição de dano 2, 17 e 19 para a condição de dano 3, 22 e 24

para a condição de dano 4 e para a última condição, ou seja, o dano 5 são expressos nos mapas 27 e 29.

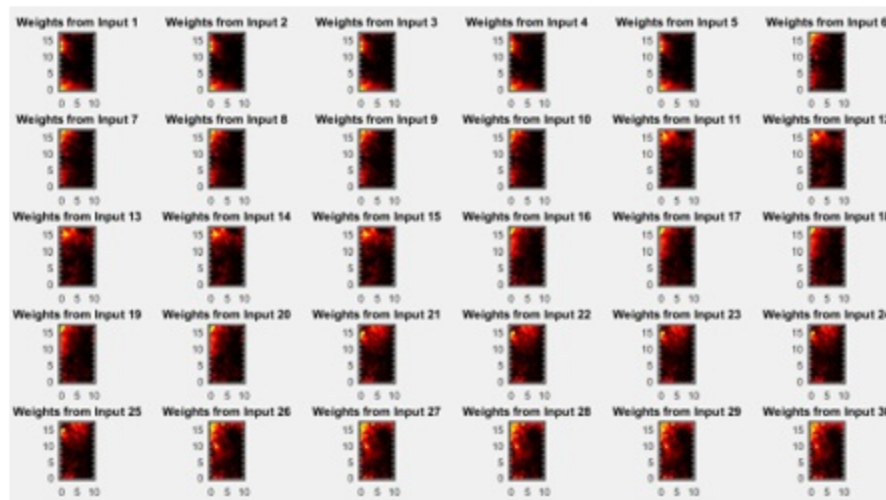
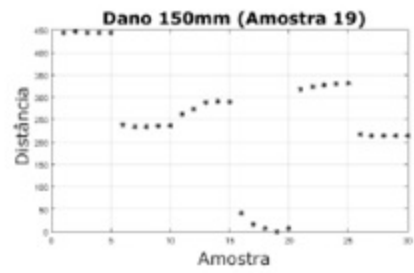
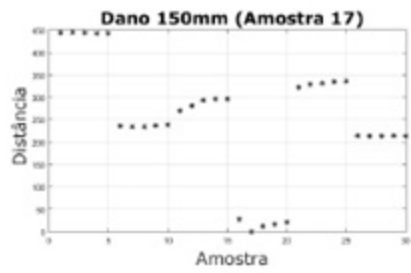
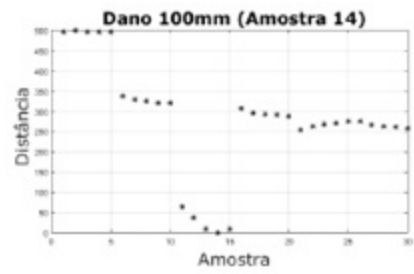
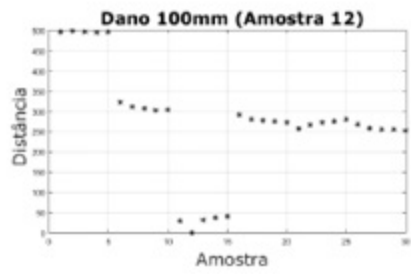
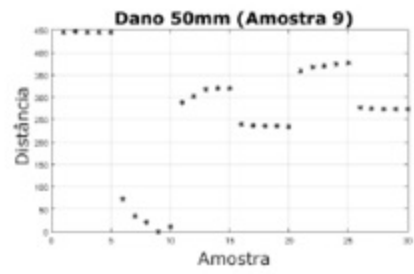
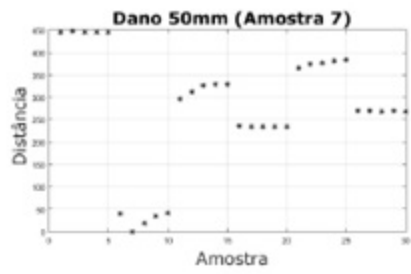
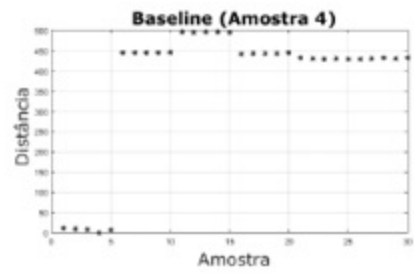
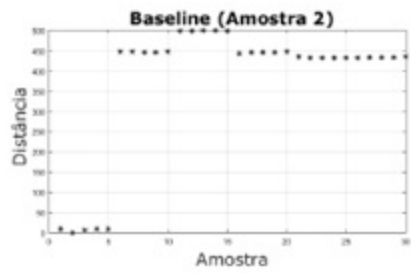


Figura 59. Mapas auto-organizáveis obtidos no processo de simulação da rede

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, a fim de se estabelecer uma análise quantitativa da precisão da rede em relação ao reconhecimento de padrões, aplicou-se a formula da distância comparando as respostas dos padrões utilizados na fase de treinamento com as respostas dos sinais de teste da rede. A Figura 60 apresenta as distâncias encontradas para cada padrão.



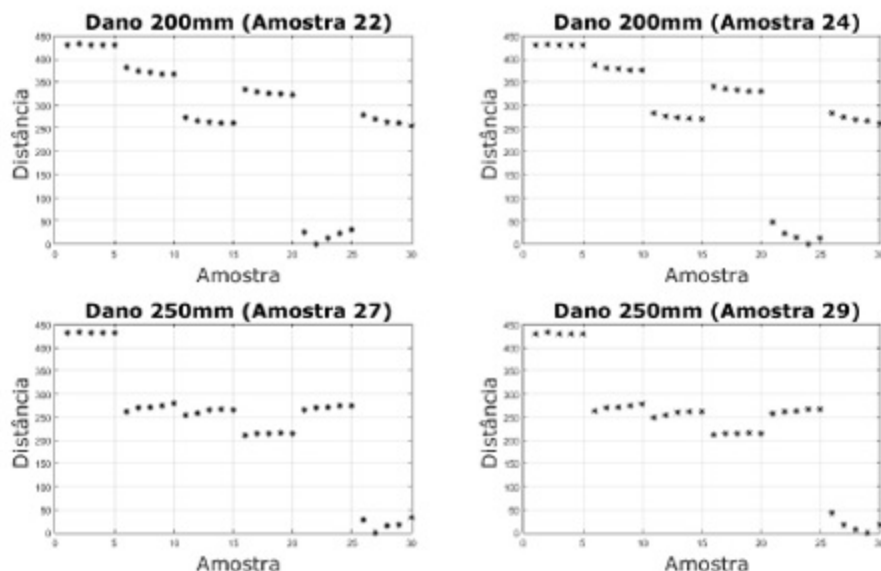


Figura 60. Avaliação quantitativa dos resultados pelo cálculo da distância

Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, torna-se perceptível que a utilização desta metodologia, no âmbito da análise da integridade estrutural, se torna factível e de grande aplicação devido a sua versatilidade e capacidade de integralização a outros métodos já consagrados na literatura.

Considerações finais

Neste trabalho, foi apresentada a aplicação de uma metodologia de classificação de danos em estruturas compósitas, fazendo-se para isso a utilização de mapas auto-organizáveis de Kohonen e da técnica de SHM baseada em impedância eletromecânica.

A partir dos resultados obtidos no procedimento experimental, pode-se inferir que o meta-modelo conseguiu classificar com eficiência as diferentes condições de danos impostos à viga de alumínio utilizada, demonstrando o potencial das redes SOM no âmbito da análise da integridade estrutural.

É importante ressaltar que, a aplicação de tal metodologia agregada a outras propostas de quantificação de danos já consagradas na literatura, torna-se de grande aplicabilidade no processo decisório.

Assim sendo, pretende-se realizar como trabalhos futuros a aplicação desta e de outros tipos de redes já difundidas de modo a elaborar modelos mais robustos de avaliação de danos, agregando-os também a técnicas já desenvolvidas pelo grupo.

Referências

- AFFONSO, Gustavo S. **Mapas auto-organizáveis de kohonen (SOM) aplicados na avaliação dos parâmetros da qualidade da água**. 2011. 89f. Tese (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BAPTISTA, Fabricio Guimarães; et al. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica**. 2010. 93f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Univerisade Estadual Paulista, São Paulo.
- BASTANI, Ali ; et al. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health monitoring using piezoelectric sensor array method. **Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 3, p. 305-314, 2012.
- BITTENCOURT, Carolina; et al. Estudo Experimental da Utilização do Método da Impedância Eletromecânica para Análise da Influência da Posição de Pastilhas PZT em Relação à Falhas Estruturais. In: Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2007, Uberlândia, **Anais...** Uberlândia: FEMEC, 2007.
- BULLINARIA, John A. Introduction to neural networks. **University of Birmingham**, UK, 2004a.
- _____. Self-organizing maps: fundamentals. **Introduction to Neural**, 2004b.
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, London, v. 22, n. 10, p. 804-816, 1989. Disponível em: <<http://bit.ly/2OaMNSV>>. Acesso em: 26 jul. 2017.

- INMAN, Daniel J. et al. (Ed.). **Damage prognosis: for aerospace, civil and mechanical systems**. John Wiley & Sons, 2005.
- LEUCAS, Leonardo de F. **On The Use of the Electromechanical Impedance and Lamb Waves techniques for Damage Detection on Riveted Structures**. 2009. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- MOURA JÚNIOR, José dos Reis V.; et al. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 2008. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- PARK, Gyuhae; INMAN, Daniel J. **Impedance-based structural health monitoring**. Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems, Oxford: Blackwell Science Publ, 2005, p. 275-292.
- PARK, Seunghee; JÚNIOR, Valder Steffen; INMAN, Daniel J. Identificação de corrosões em vigas usando métodos de ondas de Lamb e sinais de impedância, 2006.
- RAJU, Vinod. **Implementing Impedance Based Health Monitoring**. 1997. Tese (Doutorado). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- SEPEHRY, Naserodin; SHAMSHIRSAZ, Mahnaz; ABDOLLAHI, Farzaneh. Temperature variation effect compensation in impedance-based structural health monitoring using neural networks. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 22, n. 17, p. 1975-1982, 2011.

Notas

- 37.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Aluno de Graduação do Curso de Matemática Industrial. Contato: stanley-washington@hotmail.com.
- 38.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Aluno de Graduação do Curso de Matemática Industrial. Contato: brunobarella@hotmail.com.
- 39.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Aluno de Mestrado em Modelagem e Otimização do IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: joapaulo.moreira.bento@gmail.com. Bolsista de Mestrado CAPES.
- 40.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Coordenador do curso de Graduação de Matemática Industrial. Contato: zereis@ufg.br.

Como uma universidade pode ser green em tecnologia da informação?

*Stella Jacyszyn Bachega*⁴¹

*Dalton Matsuo Tavares*⁴²

*Lays Capingote Serafim da Silva*⁴³

*Carulina Marques*⁴⁴

Resumo: Da mesma forma como outras organizações, as universidades também utilizam tecnologia da informação e causam impactos socioambientais. Um meio que pode contribuir para implantar universidades sustentáveis é a utilização de conceitos e atividades de tecnologia da informação verde (*Green IT*). Dessa forma, o objetivo desse artigo é fazer um levantamento da literatura que trata da aplicação de *Green IT* em universidades para identificar formas de adoção de seus conceitos/atividades. Para tanto, empregou-se a abordagem de pesquisa qualitativa e o procedimento teórico-conceitual. Dentre os resultados, foi observado que as universidades podem se preocupar em entender melhor a percepção dos seus estudantes quanto a *Green IT*, adotar atividades e conceitos afins a *Green IT* e desenvolver *frameworks* que propiciem adotar esses conceitos/atividades.

Palavras-chave: Universidades sustentáveis. Tecnologia da informação. *Green IT*.

Introdução

A tecnologia da informação (TI), em algumas organizações, é considerada uma importante consumidora de energia. Assim, tornar a TI ‘verde’ surgiu na vanguarda do debate sobre impacto ambiental das empresas (Molla, 2008). Assim, o termo *Green IT* (tecnologia da informação verde), também

conhecida como *green computing* (computação verde) surgiu como uma tendência mundial, com foco na redução dos impactos no meio ambiente causados por recursos tecnológicos.

A *Green IT* engloba hardware, software, ferramentas, estratégias e práticas que melhoram e promovem a sustentabilidade ambiental (Murugesan; Gangadharan, 2012). Para as empresas, tornar a TI ambientalmente correta não só reduzirá as emissões de carbono, mas também reduzirá significativamente os custos (Mines, 2008; Nunn, 2007).

As instituições de educação superior também são organizações que utilizam TI. Estas, conforme o Art. 12 do Decreto nº 5.773/06, são credenciadas como faculdades, centros universitários e universidades, considerando a forma de organização e prerrogativas acadêmicas (Brasil, 2006). Nas universidades, de acordo com BRASIL (2016), as atividades de ensino, pesquisa e extensão são indissociáveis, constituindo [...] “instituições pluridisciplinares de formação dos quadros profissionais de nível superior, de pesquisa, de extensão e de domínio e cultivo do saber humano”.

Para o desempenho de suas atividades, as universidades, assim como qualquer organização, também causam impactos socioambientais. Tal ponto de vista é defendido por Jabbour (2010). Ainda, podem contribuir de forma significativa para disseminar conceitos de desenvolvimento sustentável (Jabbour, 2010; Viebahn, 2002). Com base nesse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: Como as universidades podem se tornar ambientalmente corretas quanto a TI?

Portanto, o presente artigo possui o objetivo de fazer um levantamento da literatura que trata da aplicação de *Green IT* em universidades para identificar formas de adoção de seus conceitos/atividades. A importância do tema universidades sustentáveis é explicitada em Alshuwaikhat e Abubakar (2008), Cole (2003), Dias et al. (2013), Kroth et al. (2015), Velazquez et al. (2006), entre outros. Quanto a redução dos impactos ambientais com o

emprego da *Green IT*, há: Ardito e Morisio (2014), Bilal et al. (2014), Frandoloso e Brandli (2015), Huet e Abbassi (2013), Murphy, Sterling e Dekate (2010), Roy (2014), Smaoui, Garbey e Mony (2008), Wadhwa e Verma (2014), dentre outros.

Esta pesquisa é vinculada com o Grupo de Estudos em Modelagem e Simulação (GEMS) e integrante do projeto de pesquisa intitulado “Proposta de abordagem integrada para alcance de universidades sustentáveis: incorporação de conceitos e atividades de *Green IT*”.

Para o alcance do objetivo, o artigo é organizado da seguinte forma: na seção um está o referencial teórico; na seção dois é apresentada a metodologia, na seção três há os resultados e discussão e, por fim, estão as considerações finais.

1. Referencial teórico

1.1 Universidade sustentável

Alguns autores propõem em seus estudos a definição sobre universidade sustentável, dentre eles estão Alshuwaikhat e Abubakar (2008), Velazques et al. (2006) e Cole (2003). Tais definições são descritas a seguir.

Alshuwaikhat e Abubakar (2008) afirmam que as questões relacionadas a sustentabilidade estão cada vez mais complexas, por isso, descrevem que universidade sustentável é aquela que possui um sistema integrado, onde são tomadas decisões, feitos investimentos e que, também, possua um sistema gerencial capaz de atingir a metas ambientais estabelecidas. Portanto, faz-se necessário o gerenciamento sistêmico destas atividades com a finalidade de redução do consumo dos recursos e diminuição dos impactos causados pelas atividades desenvolvidas nos *campus* universitários. É importante ressaltar que, para que seja alcançada a sustentabilidade na universidade, é necessário o engajamento dos *stakeholders*. Logo, a comunidade, o governo e toda a

população também devem ter conhecimento das medidas adotadas para que as mesmas sejam aplicadas de forma a eficiente e eficaz.

Segundo Velazques et al. (2006), para que uma universidade seja considerada sustentável, seja uma parte ou na totalidade, devem ser abordados ou promovidos aspectos como a minimização dos impactos negativos sobre o ambiente, os efeitos econômicos, sociais e de saúde gerados com o emprego de seus recursos. Assim, o objetivo é de que sejam desenvolvidas as atividades de ensino, pesquisa e extensão, bem como ajuda a sociedade por meio de práticas cada vez mais sustentáveis.

Cole (2003) afirma que o *campus* universitário, para ser considerado sustentável, deve agir de acordo com suas responsabilidades, tanto locais como globais, de forma que sejam oferecidas melhorias de saúde e bem-estar para a sociedade. A universidade deve se envolver em abordagens ecológicas, enfrentando os desafios sociais do presente e que podem aparecer futuramente.

Uma abordagem integrada para se alcançar um *campus* sustentável foi proposta por Alshuwaikhat e Abubakar (2008). Estes recomendaram a adoção das seguintes estratégias: i) implementação de dado sistema de gerenciamento ambiental (SGA); ii) participação pública e responsabilidade social; e iii) ensino e pesquisa sobre sustentabilidade.

1.2 *Green IT*

Conforme afirma Murugesan (2008), a TI é responsável por grande parte dos problemas causados ao ambiente, portanto, existe uma necessidade de atitudes, como adoção de técnicas de *Green IT*, para minimizar estes danos. As atividades de *Green IT* beneficiam o ambiente ao se adotar medidas capazes de reduzir os gastos energéticos e as emissões de gases poluentes. Desenvolver as atividades de TI de forma sustentável é um tópico que ganha cada dia mais relevância. A TI causa impactos ambientais durante diversos

estágios, cada fase da ‘vida’ de um computador é responsável por danos ambientais, seja durante a produção, uso ou descarte. Assim, faz-se necessária a descoberta de novos meios para que as atividades sejam realizadas de forma sustentável.

Ainda conforme Murugesan (2008), uma abordagem de caráter holístico pode ser adotada, considerando o ciclo de vida dos itens tecnológicos:

- Utilização verde: buscar a redução do gasto de energia de sistemas de informação e de computadores, cabendo usá-los de forma ambientalmente correta.
- Eliminação verde: reformar e reutilizar computadores antigos, e reciclar computadores indesejados e outros equipamentos eletrônicos de forma adequada.
- Projeto verde: projeto eficiente de energia e componentes ambientalmente saudáveis, computadores, servidores e equipamentos de refrigeração.
- Produção verde: produção de componentes eletrônicos, computadores e demais subsistemas associados com pouco ou nenhum impacto sobre o meio ambiente.

Segundo os dizeres de Murugesan e Gangadharan (2012), quando se trata de *Green IT* é possível estabelecer duas ondas. A primeira tem como foco repensar os produtos e processos, aplicando a reengenharia em busca de aprimorar a eficiência energética, o uso e requisitos de conformidade. Já na segunda onda, incentiva-se reduzir a destruição do meio ambiente e reduzir a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. Agora, o enfoque é em se transformar o ambiente de negócios, inovação de TI focando em sustentabilidade e sustentabilidade em ambientes organizacionais. Já Molla (2008) propôs um modelo para adoção de *Green IT*. Este modelo foi chamado de GITAM (*Green IT Adoption Model*) desenvolvido define *Green IT* a partir de quatro perspectivas distintas e inter-relacionadas.

2. Metodologia

A abordagem de pesquisa utilizada nesta pesquisa foi à qualitativa, conforme Creswell (1994). Para verificar os trabalhos e artigos selecionados, aproximou-se do fenômeno estudado. Ainda, esta abordagem foi utilizada devido a característica dos dados coletados e analisados.

Quanto ao procedimento de pesquisa, utilizou-se o teórico-conceitual. Este procedimento, segundo Heerdt e Leonel (2007), é uma revisão de literatura, que visa suportar um novo estudo mediante um levantamento bibliográfico. Berto e Nakano (2000) complementam que este procedimento classifica discussões conceituais baseadas nas revisões bibliográficas e na literatura. A finalidade de adoção do referido procedimento neste artigo é a pré-orientação teórica quanto ao tema tratado e para verificar a existência de publicações afins ao uso de *Green IT* em universidades.

Para coleta dos dados, foram pesquisadas as bases de dados Science Direct, IEEE Xplore e Compendex, considerando a língua inglesa, com intuito de encontrar estudos relevantes na área. O uso destas bases eletrônicas é defendido por Dybå, Dingsøyr e Hanssen (2007) e Engström, Runeson e Skoglund (2010). O horizonte de tempo de pesquisa foi 2007 a 2017, considerando as palavras-chave: *green computer*, *university*, *Green IT* e as possíveis combinações. Foram excluídos da análise os trabalhos que apresentaram acesso pago, ao serem consultados na UFG, revisões secundárias da literatura, artigos repetidos identificados nas bases consultadas, resumos, trabalhos em andamento, relatórios e publicação do mesmo estudo de modo duplicado.

3. Discussão e resultados

Durante a análise das publicações selecionadas, foi identificado que as universidades podem se preocupar em entender melhor a percepção dos seus estudantes quanto a *Green IT*, adotar atividades/conceitos de *Green IT* e,

também, desenvolver *frameworks* (modelos estruturados) para propiciar a adoção de conceitos/atividades de *Green IT*, como apresentado nas seções 3.1, 3.2 e 3.3.

3.1 Percepção de estudantes universitários sobre Green IT

Nos trabalhos de Bandi, Bose e Saxena (2015), realizado na Índia, e de Semakula e Samsuri (2016), efetuado em Uganda, as universidades se preocuparam em entender como e se os seus estudantes compreendem a *Green IT*. Essa preocupação é válida, uma vez que os *campus* podem atuar como agentes de mudanças e formarem profissionais conscientes quanto a sustentabilidade. Entender como a comunidade acadêmica percebe a *Green IT*, não somente os estudantes, é importante para direcionar políticas e ações de adoção de conceitos/atividades harmônicas com a realidade local e da universidade.

Bandi, Bose e Saxena (2015) realizaram uma pesquisa na Índia em universidades e faculdades consideradas de ponta, para identificar a percepção, a adoção e a prática de *Green IT* entre os estudantes. Dentre os resultados, foi possível verificar que os estudantes possuem consciência razoável sobre o vocabulário e sobre conceitos concernentes a *Green IT*. Ainda, quanto às razões para adoção de *Green IT*, estes estão conscientes sobre a maioria, desde responsabilidade quanto ao ambiente e considerações éticas para adoção. Os estudantes seguem práticas mais voltadas para apelos como reduzir o consumo de papel. Verificou-se, também, que uma quantidade significativa dos estudantes está disposta a aderir a *Green IT*, entretanto, o custo maior inibe a adoção.

Semakula e Samsuri (2016) se preocuparam em verificar os níveis de percepção de computação verde dentre os estudantes da Universidade Islâmica, em Uganda (IUIU ou *Islamic University in Uganda*). Também, determinaram se os níveis possuíam influência do conhecimento

computacional. Os resultados apontaram que entre 452 estudantes (amostra intencional), os níveis de percepção foram considerados baixos. Considerando três dimensões sobre a percepção do conhecimento de computação verde, a experiência computacional apresentou influência em duas delas. Ademais, os alunos, em todos os níveis de experiência, não estão bem informados sobre as atividades de gerenciamento de resíduos eletrônicos.

3.2 Atividades/conceitos de Green IT presentes em universidades

Como pode ser observado no mapa mental presente na Figura 61, os seguintes autores discutiram conceitos ou atividades concernentes a *Green IT* em universidades, a saber: AlHarbi, Kor e Pattinson (2016), Alkali et al. (2017), Aung (2015), Bandi, Bose e Saxena (2015), Bischof, Mey e Iwainsky (2011), Bruneo et al. (2013), Dolwithayakul, Boonnasa e Klomchit (2015), Felthousen (2010), Hardy et al. (2012), Herrick e Ritschard (2009), James, Holmes e Munnings (2013), Semakula e Samsuri (2016), Usami et al. (2013), Yano et al. (2012).

Os trabalhos de Bandi, Bose e Saxena (2015) e Semakula e Samsuri (2016) abordaram as maiores quantidades de atividades/conceitos de *Green IT* em ambientes universitários. Entretanto, cabe ressaltar que essas pesquisas focaram na identificação da percepção de estudantes universitários quanto a essas atividades e conceitos, com discussões mais teóricas. Já em trabalhos com desenvolvimento tecnológico, análises tecnológicas ou proposições de *frameworks* para universidades, como em Aung (2015), Dolwithayakul, Boonnasa e Klomchit (2015) e Felthousen (2010), há a abordagem de menos conceitos/atividades, entretanto, apresentam aplicações práticas de *Green IT* em universidades.

Aung (2015) avaliou um ambiente de servidores *thin clientes* (“clientes leves”), na Universidade de Estudos Computacionais em Myanmar.

Verificou-se, dentre outros resultados, que o custo de configuração do *thin cliente* foi de praticamente zero, pois foi baseado em computadores obsoletos. Dolwithayakul, Boonnasa e Klomchit (2015) empregaram um computador com baixo consumo energético, de placa única (Raspberry Pi 2) com intuito de implementar um quiosque interativo. Este armazena o uso do estudante, temporariamente, e disponibiliza um sistema de reserva por computador. O servidor baseia-se em virtualização e proporciona *web service* RESTful, e software embarcado nos clientes para desligar o computador, caso esteja ocioso. A pesquisa foi realizada em determinada universidade da Tailândia. Felthousen (2010) criou um sistema distribuído, com sistemas de controle audiovisuais de salas de aula, que funcionam em um ambiente “Wake on LAN” (WOL) em dada universidade dos EUA.

Também, observou-se que o gasto de energia elétrica, devido ao uso de TI nas universidades, esteve mais presente nos resultados. A questão do resíduo/lixo eletrônico também foi levantada nos trabalhos de AlHarbi, Kor e Pattinson (2016), Bandi, Bose e Saxena (2015) e Semakula e Samsuri (2016). Salienta-se que em AlHarbi, Kor e Pattinson (2016), houve, dentre outras discussões, a investigação sobre o lixo eletrônico organizacional gerado na universidade. Ressalta-se que as universidades podem adotar inicialmente conceitos/atividades mais simples e com menores custos de implantação.

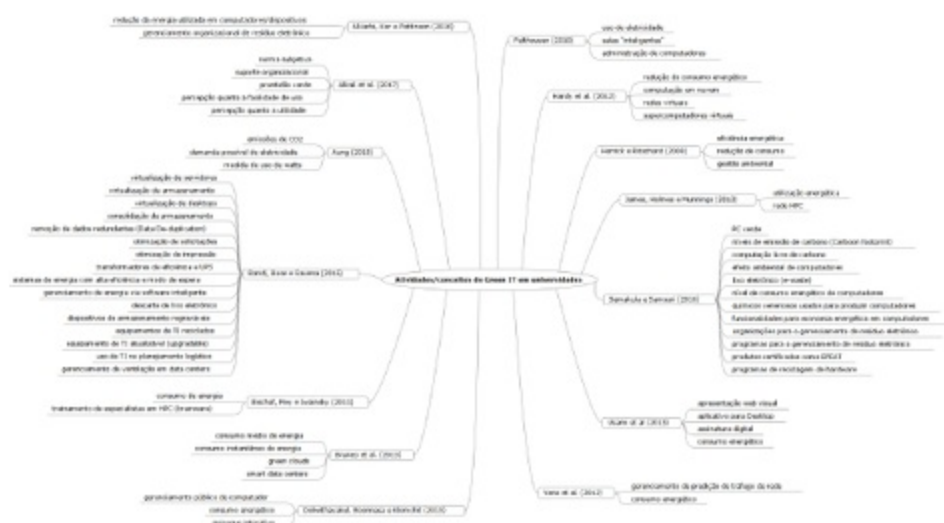


Figura 61. Atividades/conceitos de Green IT em universidades

Fonte: Dados da pesquisa.

3.3 Frameworks em universidades

Alkali et al. (2017) propuseram um *framework* que possui o intuito de compreender e explicar o comportamento do uso de TI verde em universidades nigerianas. Este *framework* pode apoiar as universidades Nigerianas no emprego de *Green IT*, com foco na diminuição da emissão de carbono. O Modelo Integrado de Adoção de Tecnologia de Informação Verde (IMGITA - *Integrated Model of Green Information Technology Adoption*), foi concebido por meio dos modelos TRA (*Theory of Reason Action*) de Fishbein and Ajzen (1975), TAM (*Technology Adoption Model*) de Davis et al. (1989) e GITAM (*Green IT Adoption Model*) de Molla (2008). O modelo postula que a norma subjetiva, o suporte organizacional, a prontidão verde explicam a adoção de *Green TI* por meio da utilidade percebida e da facilidade de uso percebida. O IMGITA pode ser visto na Figura 62.

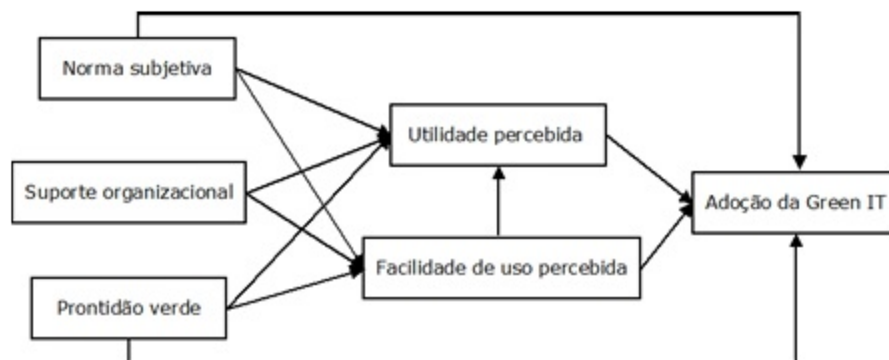


Figura 62. Modelo integrado de adoção de tecnologia de informação verde

Fonte: Adaptado de Alkali et al. (2017).

Bruneo et al. (2013) projetaram e implementaram um *framework* que visa apoiar a computação verde (*green computing*), na gestão de centros de processamento de dados em nuvem. Esta pesquisa foi realizada e

implementada em determinada universidade da Itália, objetivando diminuir o gasto energético, quando políticas de economia simplistas são levadas em consideração. Como resultado, a implementação propiciou uma configuração básica de serviço, sendo que a economia de energia foi o requisito único do sistema.

A Figura 63 apresenta a arquitetura do *framework* proposto, que visa orquestrar a detecção e atuação de funcionalidades exploradas em centros de dados heterogêneos. Há a interação com vários dispositivos de software e hardware diferentes, que são capazes de supervisionar o trabalho do centro de dados. Todas as informações podem ser analisadas e interligadas e, juntamente com políticas específicas de economia de energia, permitem um suporte sólido para o gerenciamento eficiente do sistema.

O *framework* permite que aplicativos e clientes gerenciem um centro de dados, fazendo a análise dos dados coletados de diversos dispositivos de monitoramento e especificando diretrizes para o comportamento do sistema. Alguns dispositivos são chamados de monitores e os dados fornecidos são armazenados em um banco de dados, para garantir uma recuperação fácil e um desempenho de elaboração eficiente. Outros dispositivos são chamados de atuadores, que são implementados para realizar determinadas ações para modificar as condições de trabalho do centro de dados. Também, inclui plataforma Plug-in, módulo de abstração, gerente de coordenação, analisador de requisitos de serviço e interface de usuário.

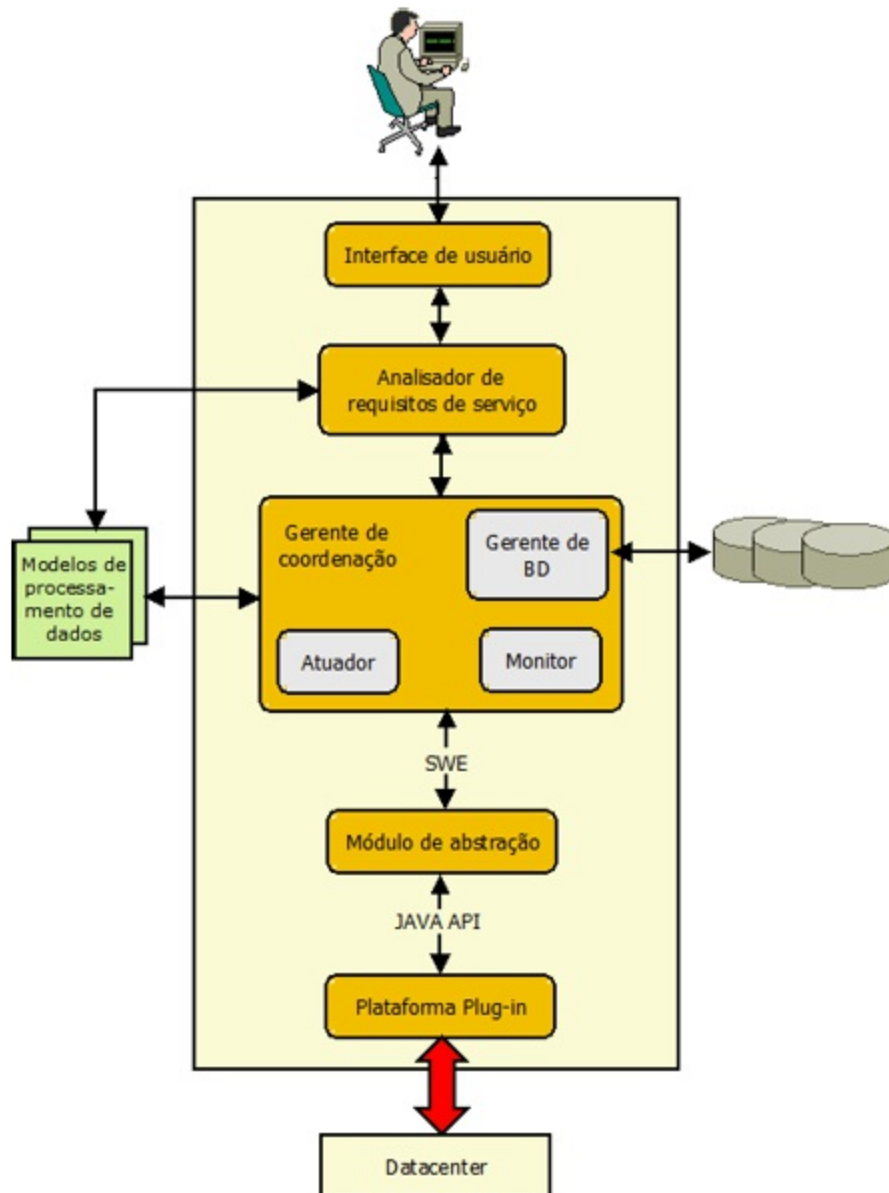


Figura 63. A arquitetura do *framework* do data center inteligente

Fonte: Adaptado de Bruneo et al. (2013).

Considerações finais

Na presente pesquisa, houve o levantamento da literatura que trata da aplicação de *Green IT* em universidades, por meio de uma revisão teórico-conceitual, e foram identificadas formas de adoção de seus conceitos/atividades. Deste modo, o objetivo almejado no artigo foi atingido.

Observou-se que algumas universidades se preocupam em entender melhor a percepção dos seus estudantes quanto a *Green IT*, adotam atividades/conceitos de *Green IT* e/ou desenvolvem *frameworks* para propiciar a implantação de conceitos/atividades de *Green IT*, como exposto nas seções 3.1, 3.2 e 3.3.

Entretanto, cabe destacar que as universidades, para adotarem a *Green IT* em sua excelência, devem desenvolver ações a mais do que apenas conscientizar a comunidade sobre a importância do tema. As universidades podem iniciar o processo de adoção de *Green IT* se envolvendo com poucos conceitos e atividades. Pode-se, também, estabelecer um planejamento de implantação da *Green IT* em sua totalidade, considerando as restrições e características de cada instituição. Esses planejamentos podem ser orientados mediante o uso de *frameworks* **já estabelecidos na literatura ou com a adequação desses modelos estruturados para a realidade institucional.**

Espera-se que a presente pesquisa sirva como base para demais pesquisadores da área, contribuindo como fundamentação inicial para pesquisas concernentes ao tema tecnologia da informação verde. Sugere-se, para pesquisas futuras, que uma revisão sistemática da literatura seja feita sobre *Green IT*, considerando seu uso em universidades. Ainda, pode-se aplicar seus conceitos e/ou atividades na realidade de uma instituição de ensino superior.

Agradecimentos

Os autores do artigo gostariam de agradecer o apoio oferecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás – FAPEG na forma de recurso financeiro, garantido pelo edital nº 03/15. Também, gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

Referências

- ALHARBI, Latifah M.; KOR, Ah-Lian; PATTINSON, Colin. Effective Green IT Strategy in a UK Higher Education Institute. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEPENDABLE, AUTONOMIC AND SECURE COMPUTING, 14., 2016, Auckland. **Proceedings...** Auckland: IEEE, 2016. p. 251-256.
- ALKALI, Ahmed Umar; et al. Towards Low Carbon Universities in Nigeria: Agenda for Green Information Technology. **Chemical Engineering Transactions**, v. 56, p. 733-738, 2017.
- ALSHUWAIKHAT, Habib M.; ABUBAKAR, Ismaila. An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, p. 17771785, 2008.
- ARDITO, Luca; MORISIO, Maurizio. Green IT - Available data and guidelines for reducing energyconsumption in IT systems. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 4, p. 24-32, 2014.
- AUNG, W. W. Preserving Green Computer Labs in Developing Countries with Thin Technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOOCS, INNOVATION AND TECHNOLOGY IN EDUCATION, 3., 2015, Amritsar. **Proceedings...** Amritsar: IEEE, 2015, p. 21-25.
- BANDI, Rajendra K.; BOSE, Anik; SAXENA, Ashay. Exploring Green IT Awareness and Adoption Among Indian Students. In: ACM SIGMIS CONFERENCE ON COMPUTERS AND PEOPLE RESEARCH, 2015, Newport Beach. **Proceedings...** Newport Beach: ACM, 2015, p. 87-96.
- BERTO, Rosa Maria V. S.; NAKANO, Davi Noboru. Metodologia da pesquisa e a engenharia de produção. **Produção**. v. 9, n. 2, p. 65-75, 2000.
- BILAL, Kashif; et al. A taxonomy and survey on Green Data Center Networks. **Future Generation Computer Systems**, v. 36, p. 189-208, 2014.
- BISCHOF, Christian H.; MEY, Dieter; IWAINSKY, Christian. Brainware for green HPC. **Computer Science - Research and Development**, v. 27, n. 4, p. 227-233, 2011.
- BRASIL. **Decreto no 5.773, de 9 de maio de 2006**. Dispõe sobre o exercício das funções de regulação, supervisão e avaliação de instituições de educação superior e cursos superiores de graduação e sequenciais no

- sistema federal de ensino. 2006. Disponível em: <<http://bit.ly/2Niedm6>>. Acesso em: 22 set. 2017.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Qual é a diferença entre faculdades, centros universitários e universidades?** 2016. Disponível em: <<http://bit.ly/2QwEYsm>>. Acesso em: 22 set. 2017.
- BRUNEO, D.; et al. Smart Data Centers For Green Clouds. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 8., 2013, Split. **Proceedings...** Split: IEEE, 2013, p. 3-8.
- COLE, Lindsay. **Assessing sustainability on Canadian University campuses:** development of a campus sustainability assessment framework. Canada: Royal Roads University, 2003.
- CRESWELL, John W. **Research design:** qualitative & quantitative approaches. London: Sage, 1994.
- DAVIS, Fred D. Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. **MIS quarterly**, v. 13, n. 3, p. 319-340, 1989.
- DIAS, Gabriela Figueiredo; et al. Práticas organizacionais ambientalmente corretas relacionadas com a Tecnologia de Informação: um estudo qualitativo em universidades brasileiras bem ranqueadas. In: ENCONTRO DA ANPAD, 37., 2013. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPAD, 2013, p. 1-16.
- DOLWITHAYAKUL, Banpot; BOONNASA, Pasita; KLOMCHIT, Supap. Green Public Computer Lab using Single-Board Computer and Interactive Computer Reservation System. In: INTERNATIONAL COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING CONFERENCE, 19., 2015, Chiang Mai. **Proceedings...** Chiang Mai: IEEE, 2015, p. 1-4.
- DYBÅ, Tore; DINGSØYR, Torgeir; HANSSEN, Geir K. Applying Systematic Reviews to Diverse Study Types: An Experience Report. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMPIRICAL SOFTWARE ENGINEERING AND MEASUREMENT, 1., 2007, Madrid. **Proceedings...** Madrid: IEEE, 2007, p. 225-234.
- ENGSTRÖM, E.; RUNESON, P.; SKOGLUND, M. A Systematic Review on Regression Test Selection Techniques, **Information and Software Technology**, v. 52, n. 1, p. 14-30, 2010.
- FELTHOUSEN, Mat. Reduce Costs by Reducing Power: Navigating the

- Conflict Between Administering Computers and Being ‘Green’. In: ACM SIGUCCS USER SERVICES CONFERENCE, 38., 2010, Norfolk. **Proceedings...** Norfolk: ACM, 2010, p. 113-119.
- FISHBEIN, Martin; AJZEN, Icek; FLANDERS, Ned A. **Belief, attitudes, intention and behavior**: an introduction to theory and research. Reading: Addison-Wesley, 1975.
- FRANDOLOSO, Marcos Antonio L.; BRANDLI, Luciana Londero. Assessment and Guidelines to Improve Eco-efficiency and Indoor Comfort at University of Passo Fundo, Brazil. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 9, p. 179-187, 2015.
- HARDY, James; et al. Assessment and Evaluation of Internet-based Virtual Computing Infrastructure. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OBJECT/COMPONENT/SERVICE-ORIENTED REAL-TIME DISTRIBUTED COMPUTING, 15., 2012, Shenzhen. **Proceedings...** Shenzhen: IEEE, 2012, p. 39-46.
- HEERDT, Mauri Luiz; LEONEL, Vilson. **Metodologia Científica e da Pesquisa**: livro didático. 5. ed. Palhoça: UnisulVisual, 2007.
- HERRICK, Dan R.; RITSCHARD, Mark. Greening Your Computing Technology, the Near and Far Perspectives. In: ACM SIGUCCS FALL CONFERENCE, 2009, St. Louis. **Proceedings...** St. Louis: ACM, 2009, p. 297-303.
- HUET, Jean-Charles; ABBASSI, Ikram El. Green cloud computing modelling methodology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UTILITY AND CLOUD COMPUTING, 6., 2013, Rome. **Proceedings...** Rome: IEEE/ACM, 2013, p. 339-344.
- JABBOUR, Charbel José C. C. Greening of business schools: a systemic view. International **Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 11, n. 1, p. 49-60, 2010.
- JAMES, Yvonne; HOLMES, Violeta; MUNNINGS, Daniel. Campus HPC Network Design and Monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND COMMUNICATIONS, 10., 2013, Zhangjiajie. **Proceedings...** Zhangjiajie: IEEE, 2013, p. 1504-1511.
- KROTH, Giana Lucca; et al. Uso da Simulação Computacional para Avaliação do Impacto Ambiental Gerado pela TI. In: ENCONTRO DA

- ANPAD, 39., 2015, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ANPAD, 2015, p.1-11.
- MINES, C. The Dawn of Green IT Services. **FORRESTER Research Inc**, p. 1- 14, feb. 2008.
- MOLLA, Alemayehu. GITAM: A Model for the Adoption of Green IT. In: Australasian Conference on Information Systems, 19., 2008, Christchurch. **Proceedings...** Christchurch: AISEL, 2008, p. 3-5.
- MURPHY, Richard; STERLING, Thomas; DEKATE, Chirag. Advanced Architectures and Execution Models to Support Green Computing. **Computing in Science & Engineering**, p. 38-47, 2010.
- MURUGESAN, San. Harnessing green IT: principles and practices. **IEEE IT Professional**, v. 10, n.1, p. 24-33, 2008.
- _____; GANGADHARAN, G. R. **Harnessing green IT**: principles and practices. Wiley and Sons Ltd., UK, 2012.
- NUNN, S. Green IT: Beyond the data centre how IT can contribute to the environmental agenda across and beyond the business. **Accenture**, p. 1-7, 2007.
- ROY, Sancharan. Green-learning in India. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTING & COMMUNICATION TECHNOLOGIES, 4., 2014, Rohtak. **Proceedings...** Rohtak: RG Education Society, 2014, p. 447-450.
- SEMAKULA, Isa; SAMSURI, Suhaila. Green Computing Knowledge among Students in a Ugandan University. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR THE MUSLIM WORLD, 6., 2016, Jakarta. **Proceedings...** Jakarta: IEEE, 2016, p. 199-204.
- SMAOUI, Malek; GARBEY, Marc; MONY, Cendrine. Virtual Prairie: going green with volunteer computing. **Proceedings...** 2008 IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference, p. 428-434, 2008.
- USAMI, Jun; et al. A Visualization system to raise awareness of electricity conservation in a university building. In: IEE GREEN TECHNOLOGIES CONFERENCE, 2013, Denver. **Proceedings...** Denver: IEEE, 2013, p. 380-385.
- VELAZQUEZ, Luis; et al. Sustainable university: what can be the matter? **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 810-819, 2006.
- VIEBAHN, Peter. An environmental management model for universities:

from environmental guidelines to staff involvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 1, p. 312, 2002.

WADHWA, Bharti; VERMA, Amandeep. Energy Saving Approaches for Green Cloud Computing: a review. **Proceedings...** 2014 RAECS UIET Panjab University Chandigarh, p. 6-8, 2014.

YANO et al. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE SWITCHING AND ROUTING, 13., 2012, Belgrade. **Proceedings...** Belgrade: IEEE, 2012. p. 250-255.

Notas

41. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

42. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Biotecnologia. Contato: dalton_tavares@ufg.br.

43. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Bolsista de Mestrado da CAPES. Contato: laysengenharia7@gmail.com.

44. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: carol.engdeprod@gmail.com.

Uma abordagem para tratar prioridade no carregamento de itens em contêineres

*Oliviana Xavier do Nascimento*⁴⁵

*Thiago Alves de Queiroz*⁴⁶

Resumo: O presente trabalho busca resolver o problema de decidir quais caixas empacotar em um contêiner quando se deseja maximizar o volume carregado, dado que algumas caixas possuem prioridade sobre outras para estarem presentes no empacotamento. Considera-se a prioridade como um segundo objetivo a ser maximizado, tal que o problema é considerado multiobjetivo. Utiliza-se uma abordagem que permite considerar os dois objetivos em uma única função pseudo-objetivo de modo que se pode escolher um peso para atribuir a cada um dos objetivos. Resolve-se, então, instâncias, atribuindo diferentes pesos para cada um dos objetivos, tal que se comparam as soluções encontradas para uma mesma instância por meio da curva de Pareto. Os resultados das comparações mostram que as soluções que maximizam a prioridade não são tão boas em relação à maximização do volume e vice-versa, indicando relativo conflito entre os objetivos.

Palavras-chave: Carregamento de contêineres. Restrição de Prioridade. Multiobjetivo.

Introdução

Um problema que surge no contexto de carregamento de caixas retangulares em recipientes, como contêineres ou baús de caminhões, é o de decidir quais caixas devem ser carregadas no recipiente para que o volume empacotado seja máximo (Bortfeldt; Wäscher, 2013). Em alguns casos, tal decisão está ligada ao fato de que algumas caixas possuem prioridade sobre

outras para estarem presentes no carregamento. A prioridade se deve, por exemplo, à presença de caixas com prazos de entrega mais urgentes do que os de outras caixas (Bischoff; Ratcliff, 1995). Nestes casos, o objetivo pode ser carregar o maior volume de caixas no recipiente, desejando caixas com alta prioridade, ou até mesmo carregar a maior quantidade possível de caixas de alta prioridade.

Na literatura, a questão de prioridade no carregamento de itens em contêineres foi tratada em alguns trabalhos, como os de Ren, Tian e Sawaragi (2011), Wang, Lim e Zhu (2013) e Vancroonenburg et al. (2014). Em Ren, Tian e Sawaragi (2011) e Wang, Lim e Zhu (2013), a proposta para resolver o problema consistiu em agrupar os itens em níveis de prioridade e, assim, tentar empacotar primeiro os itens com alta prioridade. Para o caso em que nem todos os itens com alta prioridade possam ser empacotados, tais autores desenvolveram estratégias para empacotar outros itens com prioridade inferior. Vancroonenburg et al. (2014) também propuseram agrupar os itens em níveis de prioridade. Mas, ao contrário da estratégia dos dois primeiros trabalhos, a tratada por Vancroonenburg et al. (2014) só empacota os itens com um nível de prioridade inferior se todos os itens com um nível de prioridade superior puderem ser empacotados. Cabe ressaltar ainda que Ren, Tian e Sawaragi (2011) e Wang, Lim e Zhu (2013) trataram o problema de forma heurística (quando não há garantia de que a solução encontrada é ótima), ao passo que Vancroonenburg et al. (2014) trataram o problema de forma exata (quando há garantia de que solução encontrada é ótima).

Neste trabalho, o problema de carregamento de itens em contêineres considerando questões de prioridade é abordado por uma estratégia exata, para uma função que contempla dois objetivos: 1) maximizar o volume de caixas empacotadas e 2) obter um empacotamento cujas caixas carregadas resultem na máxima prioridade possível. Para isso, utilizou-se o método da

Soma Ponderada, o qual permite combinar os dois objetivos em uma função pseudo-objetivo que associa um fator de ponderação a cada objetivo. O fator de ponderação permite conceder um peso diferente a cada um dos objetivos. Busca-se, então, para cada fator de ponderação, maximizar uma função objetivo que considera o volume do empacotamento e o peso referente a importância (prioridade) dos itens, visando construir a curva de Pareto.

A curva de Pareto, tal como é considerada neste trabalho, é traçada sobre um conjunto de pontos que representam soluções não-dominadas para os objetivos abordados, ou seja, soluções tais que nenhuma delas consegue melhorar um dos objetivos sem piorar ao menos um outro objetivo. Este último fato traduz o postulado de Edgeworth-Pareto, que se baseia na ideia de que a melhoria de um aspecto em um problema está condicionada a piora de outro aspecto (Lobato, 2008). Dessa forma, o aumento da quantidade de caixas com alta prioridade na solução está condicionado à diminuição do volume de caixas empacotadas e vice-versa, o que faz com que a curva de Pareto seja formada por soluções, tais que uma parte favorece a prioridade em detrimento do volume e a outra parte favorece o volume em detrimento da prioridade.

Neste ponto, cabe a pessoa encarregada de tomar decisões no setor de carregamento de mercadorias escolherem qual, dentre as soluções representadas na curva de Pareto, melhor atende às necessidades da empresa. Tais necessidades podem estar relacionadas às configurações de empacotamento contendo mais caixas com alta prioridade, mesmo com perdas no que tange ao volume empacotado, ou um cenário em que o volume geral é mais importante, ou ainda uma configuração em que a perda com relação ao volume e a prioridade seja mais equilibrada.

Para resolver o problema de otimização resultante, que é NP-Difícil (Garey; Johnson, 1979), utiliza-se a abordagem de Nascimento e Queiroz (2017). Primeiro, resolve-se, por meio da programação inteira, o modelo da

mochila 0-1, que aponta um subconjunto que atende ao objetivo desejado ao mesmo tempo que a soma dos volumes dos itens escolhidos não excede o volume do recipiente. Em seguida, resolve-se um modelo de programação por restrições para verificar se há como empacotar, sem sobreposição de itens, o subconjunto indicado ao resolver a mochila 0-1. Se isso é possível, a solução do modelo retorna as posições em que os itens são empacotados, caso contrário, um corte é inserido junto ao modelo da mochila 0-1, indicando que um novo subconjunto precisa ser encontrado. Esse tipo de abordagem também foi utilizada por Queiroz et al. (2017), Baldacci e Boschetti (2007) e Caprara e Monaci (2004) para resolver problemas de corte e empacotamento bidimensionais.

Por fim, o ganho deste trabalho está em tratar a questão de prioridade no carregamento de itens em contêineres na função objetivo, possibilitando, desta forma, construir a curva de Pareto, a qual permite visualizar todas as soluções obtidas à medida que os objetivos são ponderados. Logo, para uma indústria ou empresa, o tomador de decisões tem em mãos uma ferramenta que aponta várias soluções conforme a importância atribuída aos objetivos, o que possibilita uma visão geral de quão boa é cada solução encontrada no que diz respeito ao volume de caixas carregadas e à quantidade de caixas com alta prioridade no empacotamento.

1. Desenvolvimento

No problema de Carregamento em um único Contêiner com considerações de prioridade, tem-se o contêiner definido por uma largura, comprimento e altura, sendo representados, respectivamente, por L , C e H . Os itens pertencem a um conjunto denotado por I e cada item i de I possui largura l_i , comprimento c_i , altura h_i , volume v_i e prioridade p_i . Neste trabalho, largura, comprimento e altura estão associados, respectivamente, aos eixos x , y e z . A quantidade de itens em I é denotada por m . A prioridade

p_i de cada item i é vista como um peso, logo, quanto maior o valor de p_i , maior a importância da presença do item no carregamento.

1.1 Função pseudo-objetivo para o problema

Uma solução ideal para o problema em estudo seria aquela capaz de maximizar o volume de caixas empacotadas e também a quantidade de caixas com alta prioridade. Contudo, em problemas em que se busca alcançar dois objetivos, nem sempre uma solução consegue atender a ambos objetivos com intensidade ou grau de satisfação altos (Lobato, 2008). Isso significa que uma solução pode atender a um dos objetivos ao passo que não consegue fazer a mesma coisa para o outro objetivo. Além disso, uma solução que atenda aos dois objetivos com a mesma intensidade pode não ser a melhor solução que atenda aos dois objetivos isoladamente.

Uma alternativa para tais questões está no método da Soma Ponderada, que consiste em considerar os dois objetivos em uma mesma função objetivo, de modo que eles possam ser pesados conforme a importância que se deseja atribuir a cada um (Lobato, 2008). Utilizando o método da Soma Ponderada, pode-se escrever a função pseudo-objetivo (1) para o problema em estudo.

$$\text{Maximizar } \omega \frac{f_{VOL}}{f_{VOL}^*} + (1-\omega) \frac{f_{PRIO}}{f_{PRIO}^*}, 0 \leq \omega \leq 1 \quad (1)$$

Em (1), f_{VOL} corresponde a soma dos volumes das caixas empacotadas, f_{PRIO} é a soma das prioridades das caixas empacotados, ω é o fator de ponderação que permite pesar (ponderar) os objetivos volume e prioridade, f_{VOL}^* é o valor ótimo encontrado quando se resolve o problema buscando maximizar somente o volume e f_{PRIO}^* se refere ao valor ótimo quando se maximiza somente a prioridade. Nota-se que, quanto mais próximo de 1 for o valor de ω , mais importância se está atribuindo ao volume e, quanto mais

próximo de 0 for o valor de ω , mais importância se está atribuindo à prioridade.

A curva de Pareto é traçada no espaço de objetivos e se baseia no postulado de Edgworth-Pareto, que está relacionado com a ideia de que a melhoria de um objetivo pode causar a piora de outro objetivo (Lobato, 2008). Como aqui se abordam dois objetivos, o espaço trabalhado é o. Prioridade e volume representam as dimensões deste espaço e cada ponto representa uma solução para o problema em termos dos valores f_{VOL} e f_{PRIO} , dado o fator de ponderação ω . Cada solução, por sua vez, é composta de um subconjunto S_k de itens e para cada item i de S_k são conhecidas as coordenadas X_i , Y_i e Z_i em que ele é empacotado no contêiner.

As subseções 1.2, 1.3 e 1.4 apresentam as estratégias utilizadas para encontrar f^*_{VOL} , f^*_{PRIO} e maximizar a função pseudo-objetivo (1). Tais subseções também apresentam e discutem as restrições necessárias para o problema.

1.2 Abordagem para maximizar o volume

Seguindo a metodologia utilizada por Nascimento e Queiroz (2017), tem-se que para maximizar o volume de caixas empacotado no contêiner, define-se para todo i em I uma variável ri , que assume valor 1 se o item i é escolhido, e valor 0, caso ocorra o contrário. Utilizando esta variável de decisão, tem-se o modelo (2)-(4). Neste modelo, a função objetivo (2) está relacionada com o volume carregado, que deve ser máximo. A restrição (3) impõe que tal volume não exceda o volume do contêiner. Em (4) está indicado o domínio da variável de decisão ri , para $i = 1, \dots, m$.

$$\sum_{i=1}^m v_i r_i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i r_i \leq LCH \quad (3)$$

$$r_i \in \{0,1\}, i=1,\dots,m \quad (4)$$

O modelo de programação linear inteira (2)-(4), quando resolvido, indica um subconjunto de itens de máximo volume que não excede o volume do contêiner. Tal subconjunto é denotado a partir de agora por S . No entanto, somente a resolução do modelo (2)-(4) não garante que seja possível empacotar todos os itens de S no contêiner sem que não ocorra sobreposição. Devido a isso, resolve-se um modelo de programação por restrições com o objetivo de provar se existe ou não uma maneira de arranjar os itens dentro do contêiner.

O modelo de programação por restrições consiste em definir, para cada par de itens i e j , a restrição (5). Tal restrição considera como variáveis de decisão as posições X_i, Y_i, Z_i, X_j, Y_j e Z_j onde os itens i e j são empacotados. Se para todo item i e j de S existir uma atribuição de valores para as variáveis de decisão que satisfaça a restrição (5), diz-se que os itens do subconjunto S podem ser empacotados no contêiner e uma solução ótima f^*_{VOL} foi encontrada. Caso ocorra o contrário, repete-se o procedimento descrito nesta subseção, porém, acrescentando um corte no modelo (2)-(4). O corte impede que a resolução do modelo (2)-(4) indique um subconjunto S que já foi encontrado e para o qual a resolução do modelo de programação por restrições retornou que não existe maneira viável de arranjar os itens dentro do contêiner.

$$\begin{aligned} X_i + l_i \leq X_j \vee X_j + l_j \leq X_i \vee Y_i + c_i \leq Y_j \vee Y_j + c_j \leq Y_i \\ Z_i + z_i \leq Z_j \vee Z_j + z_j \leq Z_i, \forall i, j \in S \end{aligned} \quad (5)$$

1.3 Abordagem para maximizar a prioridade

A abordagem para maximizar a prioridade é análoga a descrita para maximizar o volume. O que muda é que a função objetivo no modelo (2)-(4) considera que a soma das prioridades p_i dos itens selecionados tem de ser máxima, ao invés da soma dos volumes. Assim, a função objetivo que busca maximizar a prioridade é dada em (6).

$$\text{maximizar } \sum_{i=1}^m p_i v_i \quad (6)$$

Substituindo a função objetivo (2) pela função (6) no método explicado na subseção anterior, encontra-se uma solução ótima de valor f^*_{PRIO} .

1.4 Abordagem para maximizar a função pseudo-objetivo

Para maximizar a função pseudo-objetivo (1), utiliza-se a mesma abordagem descrita na Subseção 1.2, contudo, substituindo a função (2) pela função (1). As restrições (3) e (5) não sofrem modificações.

A abordagem deve ser aplicada para n valores de ω escolhidos no intervalo $[0,1]$. Ao fazer isso, encontra-se uma solução para cada ω . Esta solução consiste em uma atribuição de valores para as variáveis de decisão r_i , além de valores para f_{VOL} e f_{PRIO} e, conseqüentemente, para a função pseudo-objetivo (1). Com os valores de f_{VOL} e f_{PRIO} encontrados para cada ω , constrói-se a curva de Pareto.

2. Experimentos computacionais e resultados

A abordagem apresentada para resolver o problema de carregamento em um único contêiner com considerações de prioridade foi codificada em linguagem C++. Para resolver os modelos que a compõem, utilizaram-se as bibliotecas do pacote *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.1* (IBM, 2014).

Para validar a abordagem, realizaram-se experimentos computacionais em 3 instâncias. Os dados sobre a quantidade de itens, dimensões do contêiner e dos itens contidos nas instâncias foram obtidos de instâncias utilizadas por Junqueira, Morabito e Yamashita (2012). As informações sobre a prioridade foram acrescentadas. Trabalhou-se com 3 níveis de prioridade: alta ($pi = 3$), média ($pi = 2$) e baixa ($pi = 1$). As informações sobre a quantidade de itens e tamanho do contêiner nas 3 instâncias são mostradas na Tabela 27. Além disso, cada instância foi resolvida para 11 fatores de ponderação ω .

Instância	Quantidade de itens	Tamanho do contêiner (L x C x H)
01	10	30x30x30
02	13	30x30x30
03	13	20x20x20

Tabela 27. Informações sobre as instâncias testadas

Fonte: Próprio autor.

As Tabela 28, 29 e 30 apresentam, para cada fator de ponderação ω utilizado, os valores assumidos pelas funções objetivo f_{VOL} e f_{PRIO} , dada as soluções encontradas. Essas tabelas também apresentam os valores obtidos para a função pseudo-objetivo a cada ω . As Figuras 64, 65 e 66 mostram a curva de Pareto para as instâncias 01, 02 e 03, respectivamente. Tais curvas foram construídas, cada qual, utilizando os dados mostrados nas colunas f_{VOL} e f_{PRIO} das Tabelas 28, 29 e 30. Os pontos são poucos porque há soluções iguais para diferentes valores de ω , uma vez que os dois objetivos estão relacionados com o critério de maximização.

ω	f_{Vol}	f_{PRIO}	pseudo-objetivo
0	12438	13	1

0,1	14332	13	0,979631
0,2	14332	13	0,959262
0,3	14332	13	0,938893
0,4	14332	13	0,918524
0,5	14332	13	0,898155
0,6	16620	11	0,892523
0,7	16620	11	0,900251
0,8	17838	8	0,915965
0,9	17998	7	0,953846
1,0	17998	7	1

Tabela 28. Resultados obtidos para a instância 01

Fonte: Próprio autor.

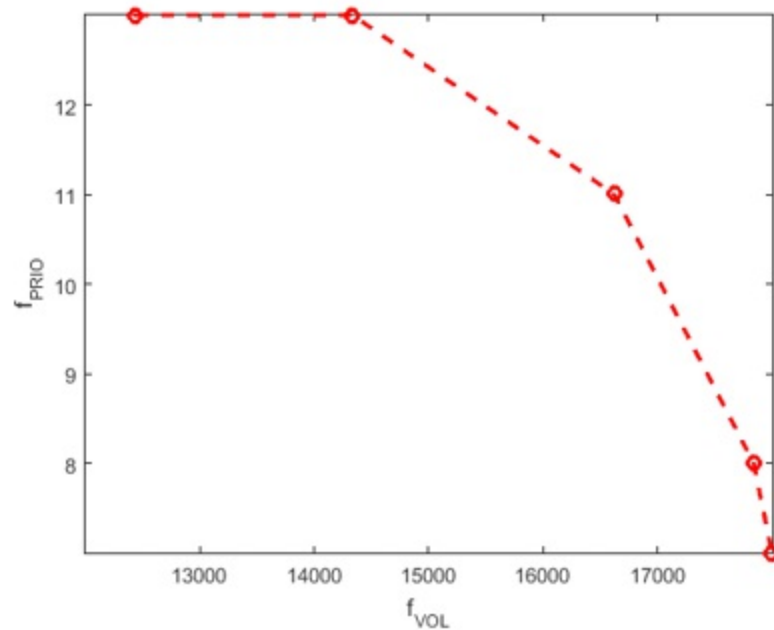


Figura 64. Curva de Pareto das soluções encontradas para a instância 01

Fonte: Próprio autor.

Nota-se, nas Figuras 64, 65 e 66, que todas as soluções encontradas não possuem, simultaneamente, o maior valor de função objetivo para os objetivos prioridade e volume. Assim, observa-se que a solução para $\omega=0$ é a

melhor encontrada para o objetivo prioridade, sendo a pior encontrada para o objetivo volume. De maneira similar, tem-se que a solução para $\omega=1$ é a melhor encontrada para o objetivo volume, sendo a pior para o objetivo prioridade. Isso ilustra claramente que nem sempre uma solução ótima para um dos objetivos vem a ser ótima para o outro objetivo.

ω	f_{Vol}	f_{PRIO}	pseudo-objetivo
0	14502	13	1
0,1	14502	13	0,975085
0,2	14502	13	0,950171
0,3	14502	13	0,925256
0,4	14502	13	0,900342
0,5	14502	13	0,875427
0,6	17224	11	0,873535
0,7	18824	9	0,889933
0,8	19314	8	0,923077
0,9	19314	8	0,961538
1,0	19314	8	1

Tabela 29. Resultados para a instância 02

Fonte: Próprio autor.

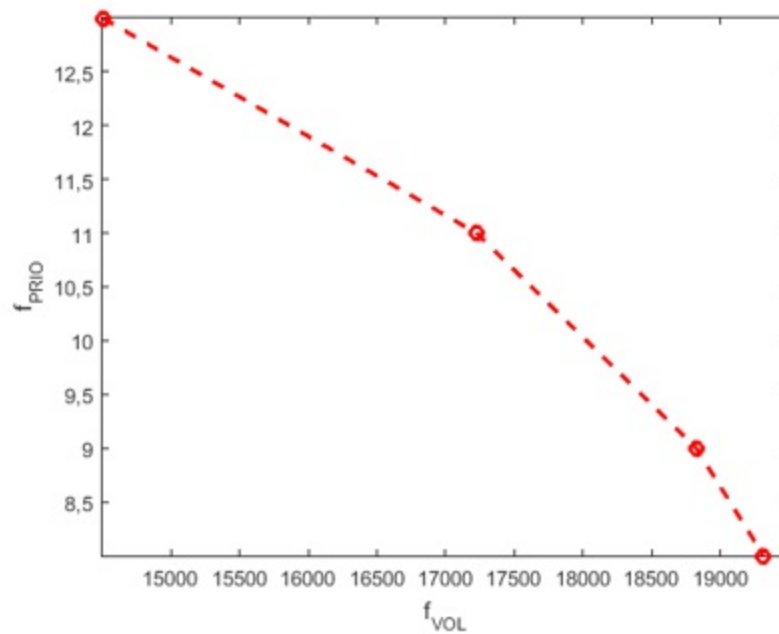


Figura 65. Curva de Pareto das soluções encontradas para a instância 02

Fonte: Próprio autor.

ω	f_{VOL}	f_{PRIO}	pseudo-objetivo
0	5097	19	1
0,1	5110	19	0,994072
0,2	5110	19	0,988144
0,3	5110	19	0,982216
0,4	5110	19	0,976289
0,5	5110	19	0,970361
0,6	5110	19	0,964433
0,7	5110	19	0,958505
0,8	5263	17	0,954058
0,9	5432	12	0,963158
1,0	5432	12	1

Tabela 30. Resultados obtidos para a instância 03

Fonte: Próprio autor.

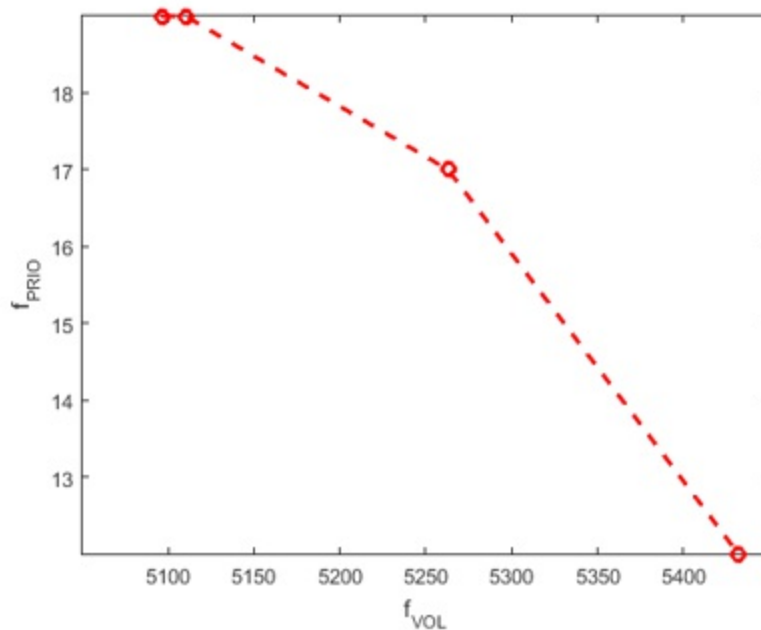


Figura 66. Curva de Pareto das soluções encontradas para a instância 03

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 31 mostra o tempo gasto em segundos para resolver cada instância. Nota-se que para a instância 03 foi preciso quase duas horas de processamento, indicando que a abordagem exata pode ter dificuldades para instâncias com relativamente poucos itens.

Instância	Tempo de resolução (s)
01	143,55
02	3.414,35
03	7.030,91

Tabela 31. Tempo de resolução de cada instância

Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Tabela 31 que o tempo de resolução das instâncias 01 e 02 foi muito superior ao da instância 01. Isso se deve ao fato dela possuir uma quantidade de 10 itens, enquanto as instâncias 02 e 03 possuem 13 itens cada.

Além disso, há o fato do problema em estudo ser NP-difícil e da abordagem exata ser aplicada 11 vezes para resolver cada instância.

Considerações finais

Neste trabalho foi desenvolvida uma abordagem para tratar a questão de prioridade no problema de carregamento de itens em um único contêiner. A abordagem utilizou o método da Soma Ponderada para modelar os dois objetivos pretendidos, volume e prioridade, em uma única função, denominada pseudo-objetivo. Para validar a abordagem, experimentos com algumas instâncias foram realizados e os resultados permitiram construir a curva de Pareto para indicar a importância de cada objetivo conforme o fator de ponderação utilizado. Com isso, pode-se escolher se é interessante priorizar o volume ou as caixas com alta prioridade durante o empacotamento.

No que diz respeito às contribuições que esta pesquisa traz, destaca-se a maneira com que a questão de prioridade no carregamento de itens em contêineres foi abordada, que se diferencia de abordagens que trataram da mesma questão, justamente, por considerar a prioridade como um segundo objetivo. Assim, tornou-se possível construir a curva de Pareto, que se configura como uma ferramenta que possibilita uma visão geral de cada solução encontrada no que diz respeito ao volume de caixas carregadas e à quantidade de caixas com alta prioridade no empacotamento.

É importante observar que o tempo requerido para resolver as instâncias foi alto, considerando um ambiente industrial que exige a tomada decisões rápidas. Diante disso, investigar estratégias para tornar a abordagem mais rápida se configura como uma opção para trabalhos futuros. Por outro lado, devido à natureza da abordagem, que é exata, o fato de ter sido possível resolver as instâncias consideradas dentro do tempo limite imposto já é um

ponto positivo. Outra opção para trabalhos futuros é considerar a prioridade como uma restrição, ao invés de tratá-la como um segundo objetivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES, CNPq (processo 308312/2016-3) e FAPEG.

Referências

- BALDACCI, Roberto; BOSCHETTI, Marco A. A cutting-plane approach for the two-dimensional orthogonal non-guillotine cutting problem. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 3, p. 1136-1149, 2007.
- BISCHOFF, E. E.; RATCLIFF, M. S. W. Issues in the development of approaches to container loading. **Omega**, v. 23, n. 4, p. 377-390, 1995.
- BORTFELDT, Andreas; WÄSCHER, Gerhard. Constraints in container loading—A state-of-the-art review. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 1, p. 1-20, 2013.
- CAPRARA, Alçbert; MONACI, Michele. On the two-dimensional knapsack problem. **Operations Research Letters**, v. 32, n. 1, p. 5-14, 2004.
- GAREY, Michael R.; JOHNSON, David S. **Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness**. San Francisco: Freeman, 1979.
- IBM. **ILOG CPLEX Optimization Studio V12.6.3 documentation**. 2014. Disponível em: <<https://ibm.co/2pgPJ5r>>. Acesso em: 28 ago. 2017.
- JUNQUEIRA, Leonardo; MORABITO, Reinaldo; YAMASHITA, Deise Sato. Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 1, p. 74-85, 2012.
- LOBATO, Fran Sérgio. **Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia**. 2008. 354 f. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- NASCIMENTO, Oliviana Xavier do; QUEIROZ, Thiago Alves de. Modelo para o Problema de Carregamento em um único Contêiner com Restrições de Agrupamento e Fragilidade. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Blumenau. **Anais do XLIX SBPO**. Rio de Janeiro: SOBRAPO, p. 2409-2420, 2017.

- REN, Jidong; TIAN, Yajie; SAWARAGI, Tetsuo. A tree search method for the container loading problem with shipment priority. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 526-535, 2011.
- QUEIROZ, Thiago Alves de. et al. Two-dimensional Disjunctively Constrained Knapsack Problem: Heuristic and exact approaches. **Computers & Industrial Engineering**, v. 105, p. 313-328, 2017.
- VANCROONENBURG, Wim; et al. Automatic air cargo selection and weight balancing: a mixed integer programming approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 65, p. 70-83, 2014.
- WANG, Ning; LIM, Andrew; ZHU, Wenbin. A multi-round partial beam search approach for the single container loading problem with shipment priority. **International Journal of Production Economics**, v. 145, n. 2, p. 531-540, 2013.

Notas

- 45.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: olivianaxn@gmail.com.
- 46.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: taq@ufg.br.

Desenvolvimento de uma rotina computacional para dosagem de concreto

*Bruno Henrique Fortuna Silva Franca*⁴⁷

*Sidney Rosa Junior*⁴⁸

*Wanderlei Malaquias Pereira Junior*⁴⁹

*Ricardo Cruvinel Dornelas*⁵⁰

Resumo: A resistência do concreto depende não apenas da qualidade dos constituintes, mas também, da sua dosagem, ou seja, a correta dosagem do concreto vai determinar a qualidade e a durabilidade do produto produzido. Portanto o objetivo dessa pesquisa é a criação de um software que permita automatizar o processo de dosagem do concreto no canteiro de obras. A rotina computacional de cálculo foi feita na linguagem de programação VB.Net do software Visual Studio. A mesma então gerou um software capaz de definir traços de concreto a partir de características pré-determinadas e que são baseados nos métodos de dosagem ABCP e EPUSP/IPT. A rotina computacional apresentou êxito em relação aos seus objetivos pois a mesma foi validada em relação aos exemplos reais testados também apresentados nesse texto. Portanto é possível a aplicação da mesma em canteiro de obras permitindo que seja sempre feita de forma técnica a dosagem do material empregado.

Palavras-chave: Dosagem de concreto, Método EPUSP/IPT, Método ABCP e Concreto.

Introdução

O início do concreto armado que hoje é aplicado nas estruturas civis foi realizado pelo francês Joseph Monier, em uma ponte de concreto armado,

construída no castelo Chazelet em 1875. *“A grande importância de Monier foi entender as características, as vantagens e desvantagens dos materiais para combiná-los adequadamente, aproveitando assim melhores características de cada material”* (Carvalho, 2008).

O concreto é um material construtivo amplamente disseminado, pode-se encontrá-lo em casas de alvenaria, rodovias, pontes, nos edifícios mais altos do mundo, torres de resfriamento, usinas hidrelétricas e nucleares, obras de saneamento e até em plataformas de extração petrolífera móveis. Estima-se que, a nível mundial, anualmente são consumidas bilhões de toneladas de concreto, o que dá, segundo a *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP)*, aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos (Pedroso, 2009).

Para obtenção de um concreto com qualidade adequada e que atenda aos requisitos de um projeto é preciso estar atento as normas vigentes que regulamentam todo o processo de fabricação desse material até a sua aplicação “in loco”. Não é apenas misturar os materiais de forma empírica sem seguir nenhum critério técnico ou científico. Para isso existem normas que regulamenta o processo de dosagem do concreto.

Segundo Helene e Tutikian (2011), o estudo da dosagem é o procedimento para se determinar a melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, ou seja, quantidade de materiais componentes do traço. Chamando de “traço” a relação entre quantidade de cimento, areia e brita. Portanto o traço é a forma de dizer as doses de cada material que constituem o concreto.

Assunção (2002), afirma que estabelecer um traço não é tarefa simples, pois nem sempre se tem em conta questões relacionadas à segurança, qualidade, durabilidade e viabilidade econômica da estrutura do concreto.

Sob tal ponto de vista, a execução de um traço que produza um concreto que esteja dentro dos parâmetros técnicos, vai além de uma simples receita, uma mistura dos seus componentes, havendo a necessidade de se aplicar o estudo de dosagem do concreto.

Sob tal fundamentação, Boggio (2000) diz que raramente o processo de dosar um concreto será completamente adaptado em rotina ou automatizado. No entanto quanto maior o conhecimento e domínio do profissional que irá realizar o procedimento de dosagem, maior serão as chances de chegar em um resultado que satisfaça as necessidades no amplo campo da engenharia civil.

O objetivo geral desse artigo é apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permita ao usuário verificar o traço de um concreto por variados tipos de dosagem. Os métodos utilizados foram os métodos da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (EPUSP/IPT).

Desenvolvimento

A seguir serão descritos os métodos de dosagem que foram aplicados no desenvolvimento do artigo aqui apresentado.

Método EPUSP/IPT

O método EPUSP/IPT que é apresentado por Helene e Terzian (1993) no Manual de Dosagem e Controle de Concreto, desenvolvido por Ary Torres, constitui em uma atualização feita na Escola Politécnica da USP do método desenvolvido inicialmente pelo IPT. Esse método foi desenvolvido para a obtenção de concreto convencional de forma teórico-experimental a partir de quaisquer materiais disponíveis regionalmente. O método tem como resultado final um diagrama de dosagem criado a partir de quatro quadrantes onde são

representadas as seguintes situações: Lei de Abrams, Lei de Lyse, Lei de Molinari e teor de argamassa seca.

Lei de Abrams: representa a resistência à compressão de um concreto e correlaciona-se com a relação a/c (água/cimento) através da curva da Figura 67 e equação (1).

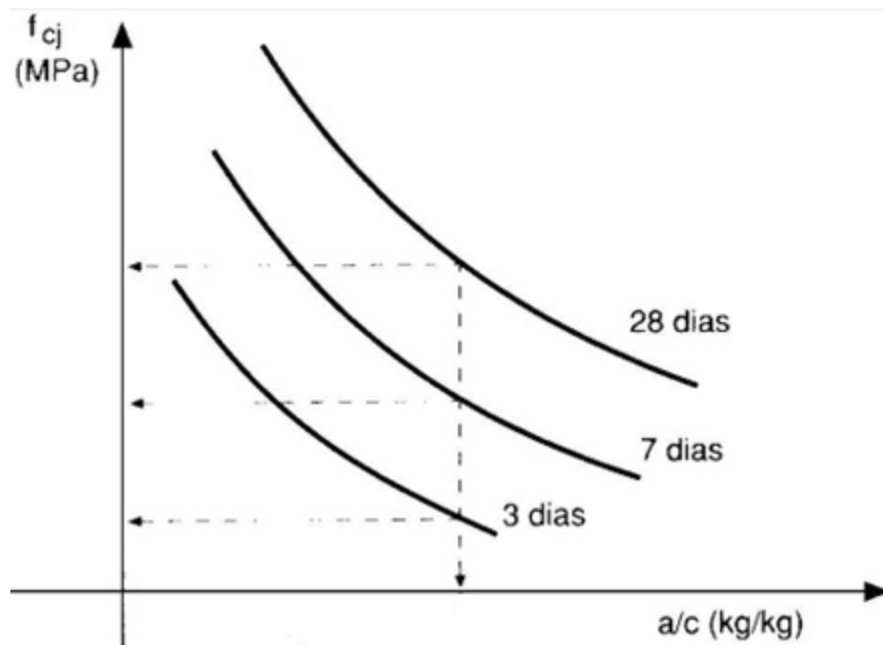


Figura 67. Curva da lei de Abrams

Fonte: Oliveira, 2010.

$$f_c = \frac{K_1}{k_2^{a/c}} \quad (1)$$

Onde:

f_c – Resistência à compressão axial (MPa);

a/c – Relação água/cimento (Kg/Kg);

K_1 e K_2 – Constantes que dependem exclusivamente dos materiais empregados.

Lei de Lyse: Para um conjunto particular de materiais, mantida a consistência do concreto medida pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, o traço m é diretamente proporcional à relação a/c . Essa lei resulta em um gráfico conforme a Figura 68 e equação (2);

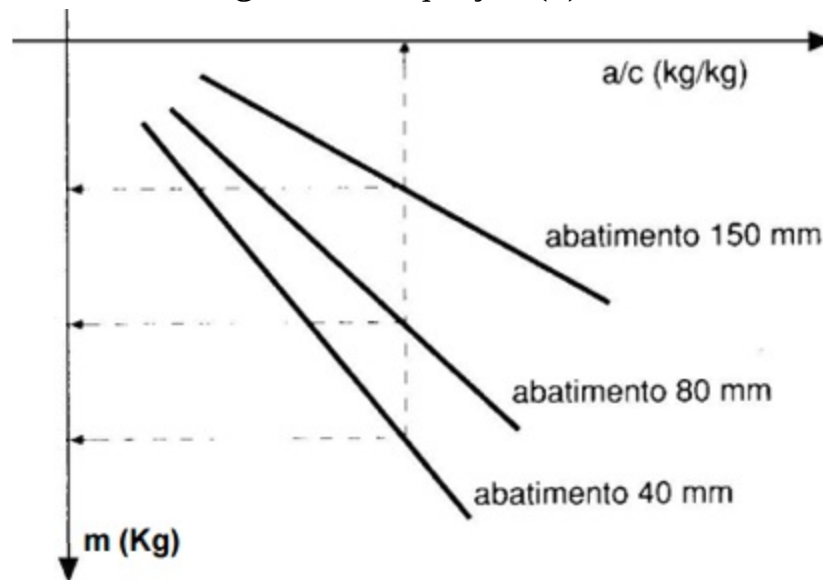


Figura 68. Gráfico da lei de Lyse

Fonte: Oliveira, 2010.

$$m = K_3 + K_4 \cdot a/c \quad (2)$$

Onde:

m – Relação agregado/cimento (Kg/Kg);

a/c – Relação água/cimento (Kg/Kg);

K_3 e K_4 – Constantes que dependem exclusivamente dos materiais empregados.

Lei de Molinari: o consumo de cimento de um concreto correlaciona-se com o valor do traço seco m através de uma curva exemplificada na Figura 69 e equação (3);

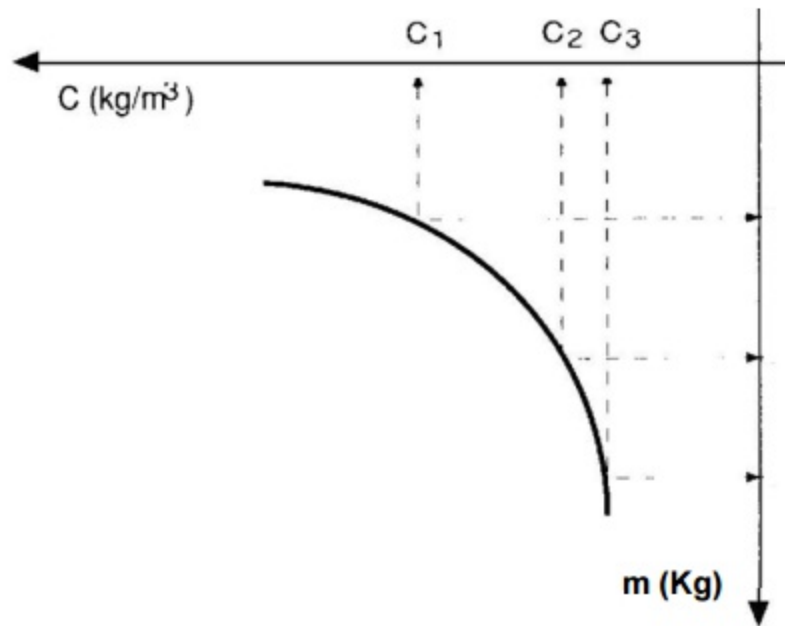


Figura 69. Curva da lei de Molinari

Fonte: Oliveira, 2010.

$$C = \frac{1000}{K_5 + K_6 \cdot m} \quad (3)$$

Onde:

C – Consumo de cimento/m³ de concreto;

m – Relação agregado/cimento (Kg/Kg);

K_5 e K_6 – Constantes que dependem exclusivamente dos materiais empregados.

Vale ressaltar que as constantes K_i dependem exclusivamente dos materiais empregados (cimento, agregados miúdos, agregados graúdos, aditivos), ou seja, fixando de maneira correta os materiais, os valores das constantes ficam determinados corretamente.

Então após todos os parâmetros serem estabelecidos, obtém-se um gráfico de dosagem de concreto similar ao apresentado na Figura 70.

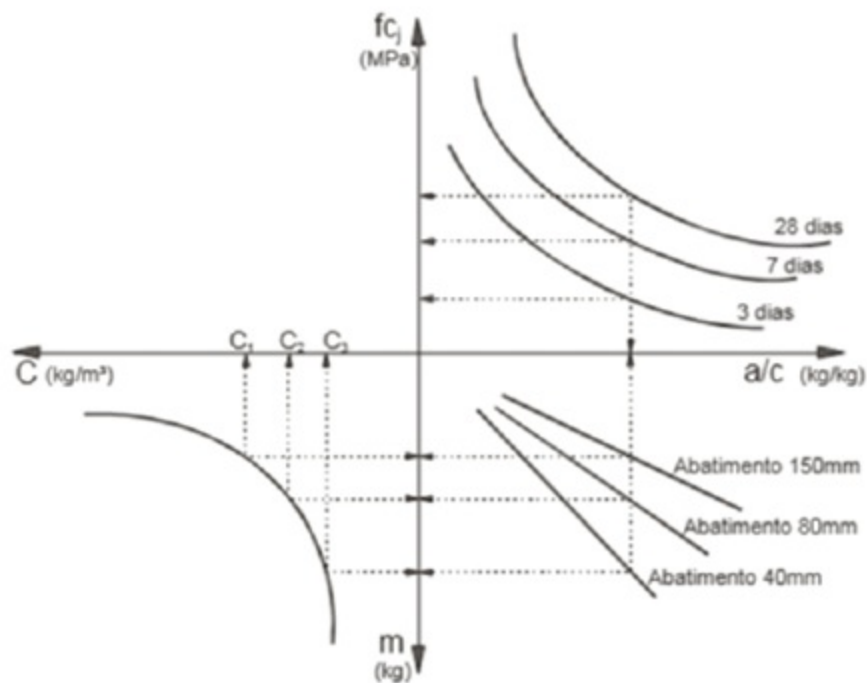


Figura 70. Diagrama de dosagem pelo método EPUSP/IPT

Fonte: Oliveira, 2010.

Segundo Oliveira (2010), para se determinar experimentalmente o comportamento de um concreto, já conhecendo todas as características dos materiais que se usa, é preciso estabelecer uma correlação própria entre o f_{cd} e o fator a/c .

Nessa etapa confecciona-se três misturas com *slump test* variando apenas o consumo de aglomerantes (cimento e aglomerantes) e a relação a/c , para em sequência moldar corpos-de-prova com os quais se determinam propriedades de interesse nos estados fresco e endurecido. Esses três amostras terão como base os seguintes traços: traço base (1:5,0), traço rico (1:3,5) e traço pobre (1:6,5).

A determinação da quantidade que será utilizado de agregado graúdo e quanto de miúdo é dada pelo teor de argamassa ideal, que é a porcentagem

necessária para preencher os vazios entre os agregados graúdos. O teor de argamassa ideal é dado pela equação (4) (Freitas, 2014).

$$\alpha = \frac{1+a}{1+a+p} \quad (4)$$

Onde:

α – Proporção argamassa seca / concreto seco;

p – Peso de pedra britada no traço (kg);

a – Peso de areia no traço (kg).

Cada agregado graúdo tem seu teor ideal, pois usando teor abaixo do ideal, haverá vazios no concreto prejudicando a sua resistência. Com o teor acima do ideal a argamassa sobrar, e assim desperdiçando cimento.

Método de dosagem ABCP

Este método de dosagem foi criado na década de 80 pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento *Portland*) por meio de experimentos modelos. O método é um procedimento analítico por completo e não necessita tecnicamente de etapas experimentais, como o método anterior da EPUSP/IPT, para chegar ao traço desejado.

O primeiro passo é preciso conhecer uma série de propriedades dos materiais que serão utilizados na fabricação do concreto, como por exemplo o tipo de cimento, massa específica do mesmo, características do agregado (granulometria, massa específica, etc.) como as características finais do concreto desejado e sendo o f_{ck} um dos principais fatores. O segundo passo é escolher o fator a/c em função da curva de Abrams do cimento que será utilizado na dosagem.

A determinação do consumo de cimento (C_c) depende diretamente do consumo de água. Feita a determinação da água e do consumo de cimento, deve-se determinar o consumo de agregados graúdos da mistura. A escolha

do mesmo irá acontecer em função do módulo de finura da areia e da dimensão máxima do agregado usado.

O passo final para os consumos consiste em determinar a variável C_m que diz respeito ao consumo de agregado miúdo. O mesmo pode ser determinado primeiramente verificando o volume de agregado miúdo. Determinado o volume de agregado miúdo encontra-se o consumo de agregado miúdo.

Por fim é feita a determinação do traço que será apresentado todo em função do consumo de cimento.

Podia colocar aqui pelo menos a equação do consumo para que possa ser visto como o mesmo é calculado.

Materiais e métodos

O presente trabalho é classificado como um trabalho de desenvolvimento tecnológico e ao mesmo tempo aplicado. Pois o seu produto final é um software gratuito que pode ser utilizado na rotina diária de canteiros de obras de Engenharia Civil.

A pesquisa bibliográfica foi baseada no Manual de Dosagem e Controle de Concreto desenvolvido por Helene e Terzian (1993) e outras bibliografias conforme citado no conjunto de referências bibliográficas desse. Primeiramente buscou-se desenvolver um fluxograma de aplicação dos métodos de dosagem aqui explanados. Os fluxogramas são apresentados logo a seguir nas Figuras 71.

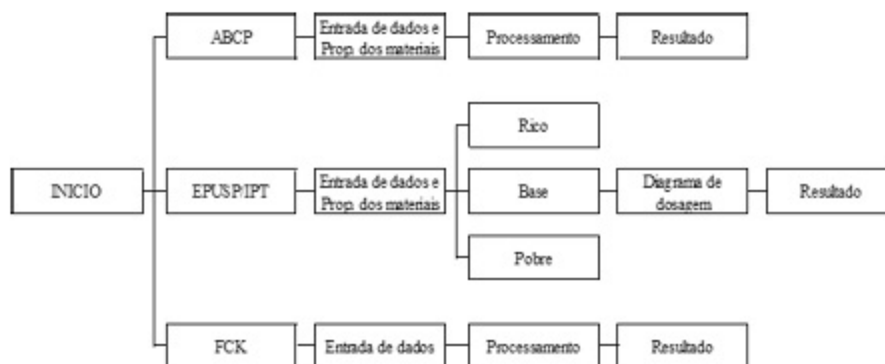


Figura 71. Fluxograma de aplicação dos métodos de dosagem

Fonte: Próprio autor, 2017.

Definido o fluxo de programação de cada método o mesmo foi implementado em linguagem VB.NET e então foram reproduzidos alguns resultados a partir desse software, denominado aqui de AVES-Mixer.

Vale ressaltar que o método de dosagem ABCP é analítico e então seu processo de cálculo pode ser totalmente automatizado até os resultados. Já o método EPUSP/IPT é teórico-experimental, portanto seu uso e aplicação será sempre ligado com o LABE (Laboratório de estruturas da Regional Catalão) ou qualquer outro laboratório que se deseje utilizar, pois o mesmo depende de resultados experimentais que vão alimentando o software e assim o processo de cálculo e geração gráficos é totalmente automatizado.

Como resultados e análises propõem inicialmente verificar se as rotinas implementadas seguem fielmente resultados de outros autores que já se utilizaram desses métodos. Para tanto os resultados do software AVES-Mixer são validados com os resultados da bibliografia Franca e Junior, (2017).

De posse dos resultados da dosagem que são os traços em massa o software AVES-Mixer também gera o quantitativo de materiais necessário para um determinado volume de concreto escolhido pelo usuário.

Discussão e resultados

A rotina desenvolvida neste trabalho tem como objetivo dosar concretos de média resistência e otimizar o processo de dosagem utilizando os métodos da ABCP e EPUSP/IPT de forma automatizada. A rotina terá um pós-processado para a obtenção da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) através da elaboração de uma curva de Gauss. De maneira generalizada o programa funcionará no sistema *input* e *output*, conforme descrito abaixo:

Entrada de dados para o problema;

a) Processamento das variáveis;

b) Resultados finais.

O processo de funcionamento da rotina que contempla método da ABCP é dado nas seguintes etapas:

- Entrada de dados pelo usuário: f_{ck} de projeto, propriedades dos insumos, etc;
- Processamento dos dados de acordo com a teoria apresentada no item 1 desse trabalho e maiores detalhes podem ser encontrados em Franca e Rosa Junior (2017);
- Saída de dados que contempla o traço em (quilos ou volume) da mistura.

Já o processo de dosagem EPUSP/IPT se dá forma mais complexa, onde o usuário deverá estabelecer três traços básicos (pobre, médio e rico) que irão gerar um diagrama de dosagem.

Esse processo funciona da seguinte forma:

- Primeiro o usuário deve definir as propriedades dos materiais acessando a janela “Dados”;
- Após irá definir a idade e o abatimento que deseja, em sequência será desenvolvido três traços, acessando a janela “Rico”, “Base” e “Pobre”, que posteriormente dará origem ao diagrama de dosagem;
- Com a obtenção dos três traços e conseqüentemente o diagrama de dosagem, possibilitando a dosagem de concreto;
- O usuário agora definirá apenas o f_{ck} e o desvio padrão, em sequência o programa irá processar os dados e expressar o resultado, que será o traço.

Validação do software

Com o material de Dornelas (2016) foi possível fazer o comparativo de resultados que o software apresentou. O resultado foi satisfatório e apresentou

pequenas variações no método da ABCP com o calculado.

Validação do método EPUSP/IPT

Nesta etapa será desenvolvido um exemplo completo do método EPUSP/IPT. Inicia-se com os dados que foram ensaiados em laboratório por Dornelas (2016), em seguida será utilizado os mesmos dados no software desenvolvido para dosar concreto o concreto.

Define-se inicialmente os traços básicos que serão utilizados ao longo do processo, são eles: (a) $m = 3,5$, (b) $m = 5,0$; e (c) $m = 6,5$. Onde o m é relação agregado/cimento (Kg/Kg).

Define-se então o teor de argamassa de forma aleatória partindo de um teor de argamassa de 51,00% para 52,00%.

Depois de ter obtido os três traços, rico, base e pobre, corrigidos, pode-se gerar a curva de dosagem. O software apresenta uma caixa de texto com os traços finais corrigidos, conforme exemplo da Figura 72.

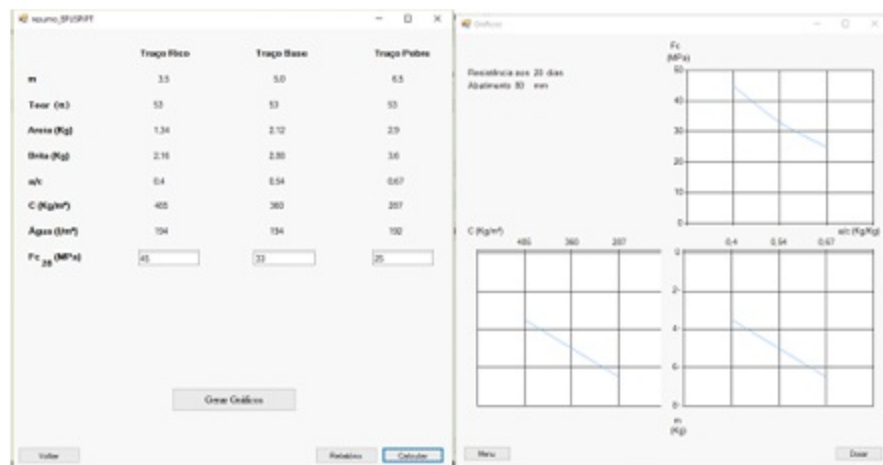


Figura 72. Resumo dos traços e diagramas de dosagem

Fonte: Próprio Autor, 2017.

A Tabela 32 apresenta os resultados gerados em laboratório e os que o software fornece após o processo ser finalizado pelo mesmo, pode-se observar que não existe variação entre os termos do traço.

Dosagem em laboratório				Dosagem pelo software			
m	a/c	Traço	C (kg)	m	a/c	Traço	C (kg)
3,50	0,40	1:1,34:2,16	485,00	3,50	0,40	1:1,34:2,16	485,00
5,00	0,54	1:2,12:2,88	360,00	5,00	0,54	1:2,12:2,88	360,00
6,50	0,67	1:2,90:3,60	287,00	6,50	0,67	1:2,90:3,60	287,00

Tabela 32. Comparativo dos resultados

Fonte: Próprio autor, 2017.

Para poder comprovar a veracidade do software será apresentado resultados de um exemplo de dosagem pelo método EPUSP/IPT desenvolvido por Dornelas (2016). O Logo para o exemplo de um concreto com as características dadas a seguir apresenta-se a Tabela 33 que determina o traço do concreto pelo método EPUSP/IPT.

- $f_{ck} = 25$ MPa;
- Desvio padrão = 4,0;
- Abatimento = 80 mm.

	f_c (MPa)	a/c	m	C (kg)	Traço
Laboratório	31,6	0,5639	5,279	346,98	1:2,26:3,01
Software	31,6	0,562	5,281	343,89	1:2,27:3,01

Tabela 33. Comparativo dos resultados de laboratório e do software

Fonte: Próprio autor, 2017.

Validação do método ABCP

Nesta etapa será desenvolvido um exemplo completo do método ABCP. Dar-se entrada dos dados que foram ensaiados em laboratório por Dornelas (2016), em seguida utiliza-se os mesmos dados no software AVES_Mixer.

Os dados testados são: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; $D_{\text{máx}} (\text{mm}) = 19 \text{ mm}$; *Slump test* = $70 \pm 10 \text{ mm}$; Cimento CII F 32; Desvio Padrão = 4,0

Desenvolvendo o método da ABCP para essas características supracitadas obtém-se o traço: 1 : 1,40 : 1,98 : 0,40.

Para finalizar será apresentado os resultados obtidos com o uso do software. Fazendo o devido preenchimento das informações dadas acima no mesmo chega-se ao seguinte traço: 1,00 : 1,80 : 2,25 : 0,45.

Os resultados são apresentados a seguir e comparam os resultados do procedimento manual executado por Dornelas (2016) e do software. Conclui-se assim que a diferença ocorre devido à relação a/c ter sido diferente da escolhida por Dornelas (2016) e também devido a identificação da resistência do cimento ser feita por Dornelas (2016) de forma visual por ábacos enquanto o software faz a verificação via a equação geradora do ábaco. O traço obtido por Dornelas (2016) foi de 1,00:1,40:1,98:0,40 enquanto o traço obtido no software foi de: 1,00:1,80:2,25:0,45.

Considerações finais

O uso do ambiente de desenvolvimento Visual Studio 2015 Express, possibilitou o desenvolvimento de uma interface gráfica, produzindo assim um software com telas intuitivas e de fácil utilização para encontrar o traço através dos métodos EPUSP/IPT e ABCP. Considerando tais características o programa também pode ser empregado como uma ferramenta de ensino, auxiliando os estudantes de engenharia no estudo às disciplinas que abordam o assunto e em outros fins como, possíveis trabalhos e projetos.

Foi possível validar a ferramenta computacional comparando os traços gerados pelo software e os traços das amostras testadas em laboratório (no caso amostras testadas na disciplina de Materiais de Construção Civil).

Os valores gerados para o procedimento EPUSP/IPT foram 100% assertivos com desvio mínimo, onde os resultados variaram a partir da

segunda casa decimal, com um percentual irrelevante. Já o software produzido para o ABCP apresentou um leve desvio nos seus resultados devido a escolha da relação água cimento e também do procedimento analítico ter identificação visual dos ábacos de resistência do cimento enquanto o software trabalha com as equações geradoras dos gráficos, ou seja, quando vai se confeccionar um concreto pelo método da ABCP manualmente é utilizado a curva de Abrams para se determinar a relação água/cimento (a/c), podendo assim gerar erros. Já fazendo a mesma dosagem utilizando o software essa determinação é feita através de equações, onde os resultados são mais precisos, assim gerando uma diferença em relação a determinação visual.

Referências

- ASSUNÇÃO, José Wilson. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região nordeste do Paraná**. 2002. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BOGGIO, Aldo J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concreto de Cimento Portland**. 2000. 182 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CARVALHO, João D. N. de. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. *Revista Tecnológica*, 2008, v. 17, p. 19-28.
- DORNELAS, R, C. **Materiais de Construção Civil II**. Universidade Federal de Goiás (UFG). Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil. 2016.
- FRANCA, Bruno Henrique F. S.; JUNIOR, Sidney Rosa. **Desenvolvimento de uma Rotina Computacional para Dosagem de Concreto**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.
- FREITAS JR., José de Almendra. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2014. 133 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle de Concreto**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 1993.

_____. TUTIKIAN, Bernardo F. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações: Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. São Paulo: IBRACON, 2011.

OLIVEIRA, Douglas Emanuel N. de. **Estudo de Métodos de Dosagem de Concretos: Método EPUSP/IPT**. Petrolina: UNIVASF, 2010.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto e Construções. **Revista Concreto e Construções**, n. 53, 2009.

Notas

47. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: brunohenrique.fortuna@hotmail.com.

48. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias Contato: sidneeyjrr@gmail.com.

49. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.

50. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: ricardocruvinelufg@gmail.com.

Gerenciamento de recursos e manutenção de materiais de uma instituição de ensino público

*Janice Rodrigues da Silva*⁵¹

*José Waldo Martinez Espinosa*⁵²

*Karine de Jesus Rodrigues Santana*⁵³

*Rodrigo Pereira da Costa*⁵⁴

RESUMO: O presente artigo trata do gerenciamento de recursos materiais, focado na manutenção de materiais, de uma instituição de ensino público. Entende-se por empresa pública como a que presta serviço com finalidade de atender as necessidades básicas da população. A metodologia para desenvolvimento deste artigo se deu através de pesquisas em livros, internet, documentos e observação por parte dos autores, sobre temas que envolvem administração pública e a real situação dos recursos da instituição. O objetivo geral é analisar o gerenciamento de recursos e manutenção de materiais de uma instituição pública. Analisados os dados coletados é possível observar que a instituição possui boa capacidade de atender a comunidade e que a falha está na administração de seus recursos materiais. Para minimizar falhas recomenda-se passar para cada setor a responsabilidade sobre seu próprio recurso material, bem como a contratação de servidor serviço geral com a capacidade de atender essa necessidade.

Palavras-chave: Instituição de Ensino Público, Recursos Materiais, Manutenção.

Introdução

As empresas têm diversas finalidades, como lucro, atender as necessidades da sociedade e de seus clientes etc. Deste modo, uma empresa pública tem por finalidade atender as necessidades básicas da sociedade.

Administrar uma empresa pública pode não ser tão fácil como parece, cuidar de seus recursos requer uma ampla capacidade em criar estratégias administrativas que proporcionem uma melhor gestão, que na maioria dos casos é limitada.

Porém, a administração mesmo que limitada é de suma importância. Maximiano (2011, p. 8) define: “a administração é uma palavra que exprime uma ideia antiga: tomar decisões que promovam o uso adequado de recursos, para realizar objetivos.” Nem sempre o uso adequado dos recursos é responsabilidade só da administração, mas sim de todos os envolvidos no processo. Assim, falhas de gestão nos recursos podem comprometer a finalidade da organização.

A limitação no gerenciamento em organizações públicas, compromete a manutenção adequada e necessária dos bens patrimoniais, cabe a gestão, buscar alternativas para tornar todos os recursos usáveis.

A questão que se pretende responder é: Como ocorre o gerenciamento e a manutenção dos materiais e recursos públicos?

O objetivo geral deste artigo é analisar o gerenciamento de recursos e manutenção de materiais de uma instituição pública. Os objetivos específicos são levantar atividades desenvolvidas na instituição quanto a administração, manutenção e planejamento do uso dos recursos.

Para desenvolvimento deste artigo foram realizadas pesquisas bibliográficas em livros, documentos, internet e pesquisa de campo, com o intuito de conhecer e levantar dados da real situação envolvendo os recursos das salas de aula, laboratórios e secretarias.

Ao longo do trabalho será mostrado, a revisão da literatura, metodologia, resultados e discussões, referências e definições de como são geridos os

recursos e a forma simples de melhorar a gestão existente.

1. Desenvolvimento

1.1 Revisão da literatura

1.1.1 Empresa

A sociedade necessita satisfazer suas necessidades e, para que isso, não basta somente que cada um desempenhe atividades de forma isolada, pois não seria capaz de atender todos os desejos e anseios, surgindo daí as empresas.

Caravantes, Panno e Kloeckner (2005) definem empresas como órgãos da sociedade que tem como finalidade satisfazer uma necessidade do indivíduo ou sociedade. As empresas servem unicamente ao seu fim, atender as necessidades do seu público alvo, dessa forma ela deve atingir sua finalidade através da realização de atividades específicas da própria organização. Chiavenato (2014, p. 40) salienta:

As organizações lucrativas produzem e vendem produtos e serviços visando um retorno financeiro de suas operações. De outro lado, as organizações não-lucrativas produzem serviços visando ao benefício público, como assistência à saúde, educação, sistema judiciário, segurança, manutenção de ruas e estradas. Na sua grande maioria, as organizações não-lucrativas são repartições públicas, organizações municipais, estaduais e federais, presídios, abastecimento de água e esgotos etc.

Nem todas as empresas servem à mesma atividade econômica, elas se diferem entre pública e privada e cada uma apresenta certas diferenças no que tange a prestação de serviço à comunidade. Essas diferenças são perceptíveis através de alguns aspectos a serem analisados.

Saldanha (2014, p. 19) apresenta algumas diferenças básicas entre administração pública e privada, conforme Tabela 34.

Aspecto	Administração pública	Administração privada
Político	Funcionamento e resultados, bons ou maus, têm impacto político. O processo decisório sofre fortes ingerências políticas.	Há autonomia decisória. O impacto político é menor.
Econômico	Orientada para o bem-estar social. <i>Output</i> em grande parte não mensurável. Organizações não competitivas no mercado. Rentabilidade dispensável (custo-benefício).	Orientada para o lucro. <i>Output</i> mensurável. Organização competitiva. Rentabilidade vital para o crescimento e sobrevivência.
Organizacional	Grandemente afetada e/ou dirigida por forças externas. Objetivos econômicos e sociais. Alto grau de interdependência entre as organizações. Órgãos com funções múltiplas	Tem controle mais amplo sobre ela mesma. Objetivos predominantemente econômicos. Maior autonomia em relação a outras organizações. Órgãos com funcionalidade específica e bem discriminada.

Tabela 34. Diferenças básicas entre administração pública e privada

Fonte: Saldanha (2014, p. 19).

De acordo com Chiavenato (2014) a empresa privada segue sua própria cultura, estabelece objetivos pautados na obtenção de lucro, já a empresa pública é orientada ao bem-estar da sociedade e, na maioria das vezes, se preocupa mais com a quantidade do que a qualidade do que é oferecido.

1.1.1.1 Empresas públicas

As empresas públicas não tem como finalidade a obtenção de lucros, mas a satisfação das necessidades básicas da sociedade. Para Pereira (2010, p. 232) empresa pública “possui personalidade jurídica de direito privado, patrimônio próprio, capital exclusivo ou de entidades estatais (União, Estado e/ou Município), criados por lei; pode ter mais de um sócio”. Dessa forma, ela não é de um único dono e poderá ter dificuldades em planejar, organizar, executar e controlar as atividades da empresa e sua gestão. Guiada pela gestão pública, ela existe para fazer cumprir as necessidades da população,

diferentemente da privada que tem suas ações direcionadas para o alcance de objetivos que, em sua maioria, resultam em lucros.

Em todos esses períodos, para fazer cumprir a função de gestão, existem princípios que norteiam a gestão pública, os quais estão listados no art. 37 da Constituição da República Federativa do Brasil:

- legalidade: a gestão pública está presa aos mandamentos da leis, caso se afaste estará sob pena de invalidade do ato e responsabilização do seu autor;
- impessoalidade: as atividades da gestão pública deve ser orientada aos cidadãos, sem discriminação ou discriminação;
- moralidade: os atos da gestão pública devem obedecer os princípios morais e buscar o melhor para o interesse público;
- publicidade: divulgar os atos e documentos para que o público interessado tenha acesso. Geralmente a divulgação é via diários oficiais.
- finalidade: seguir a finalidade da gestão pública, que é pratica de atos voltados ao interesse público;
- continuidade: os serviços públicos não podem parar, pois as necessidades da população não param;
- indisponibilidade: o Estado é o grande detentor dos bens e direitos públicos e não seus servidores;
- igualdade: não há distinção entre os cidadãos que a gestão pública atende, dessa forma, perante a lei todos devem ser tratados da mesma forma.

As gestões privadas e públicas se diferem em vários aspectos. Na gestão pública há dificuldades em lidar com uma gestão rápida e eficiente pela constante necessidade em cumprir leis e seguir princípios que, na maioria das vezes, é um limitante para a eficiência da prestação de serviços. Destaca-se,

também, que outro fator a ser observado é a forma de gestão de recursos que contribuirão com os processos administrativos.

1.2 Processos administrativos

Os processos administrativos são de suma importância para o cumprimento dos interesses da empresa, ele permite a elaboração de um planejamento capaz de conter tudo o que for realizado para melhorias; organizar a estrutura a fim de cumprir com o planejado; dirigir e conduzir o pessoal para o alcance do objetivo esperado e controlar os planos para assegurar o alcance dos resultados.

Chiavenato (2014) define processo administrativo como um processo cíclico e contínuo que comporta quatro funções administrativas: planejar, organizar, dirigir e controlar. Maximiano (2011) cita a função planejar como sendo a aplicação de um processo decisório que vai influenciar no futuro; organizar como a divisão em partes ordenadas de acordo com algum critério estabelecido; executar que é a realização das atividades; e controlar que é manter a direção do objetivo.

Para planejar um processo administrativo requer tomada de decisão, a qual influenciará as práticas que estão por vir. Dessa forma, não podem ser meros pensamentos e, ainda, segundo Maximiano (2011), é composto por etapas (aquisição de dados e processamento de dados de entrada e preparação de um plano) nas quais comportam erros e acertos que dependem da competência, principalmente, do planejador da ação.

Todo processo administrativo necessita de um aparato de recursos, como humanos, financeiros e técnicos. Esses recursos necessitam de organização feita através de decisões tomadas a partir de análise de critérios estabelecidos de acordo com a estrutura da empresa, das responsabilidades, dos níveis de autoridade e dos objetivos a serem alcançados.

A execução ocorre depois do planejamento e organização e, a seguir, é tempo de colocar em execução, realizar tudo que foi estabelecido, reunindo recursos e colocando-os a disposição da organização para fazer cumprir as metas estabelecidas. De acordo com Maximiano (2011), nesse processo os planos se tornam concretos e, o que antes constava apenas no papel, começa a tomar forma, dar resultados, requerendo dos envolvidos energia para mover e chegar ao objetivo esperado.

No controle está envolvida a tomada de decisão sobre o que já foi realizado. Nesse estágio, segundo Maximiano (2011), são definidos: controle de qualidade, comparação e ação corretivas e recomeço do ciclo, caso necessário. Um dos objetivos do controle, que pode ser citado, é a manutenção. A manutenção é um conjunto de ações que visam conservar e adequar os equipamentos. Nascif e Kardec (2001) salientam que ela deve contribuir para o atendimento da programação da empresa, maximizando a disponibilidade e otimização dos recursos com qualidade e segurança.

Nem sempre seguir esses processos administrativos é uma tarefa fácil para a organização. O que influencia é o tipo de instituição, se de caráter público ou privado, pois há diferenças na maneira de administrar os recursos envolvidos, principalmente, no que tange órgão público ou empresa pública.

1.3 Recursos Humanos e materiais na empresa pública

Toda organização, para funcionar adequadamente, necessita de diversos tipos recursos, dos mais importantes destacam-se os humanos e materiais.

Chiavenato (2014) define recursos humanos como um grupo de contribui para a organização ser capaz de servir um propósito e recursos materiais como edificações, instalações, equipamentos e etc.

Na administração pública adquirir recursos humanos não é tão simples quanto na privada. Saldanha (2014) aponta dois tipos de vínculos empregatícios na empresa pública: os estatutários que seguem o regime de

estatuto dos servidores públicos e os celetistas, que tem contrato que obedece a CLT – Consolidação das Leis Trabalhistas.

Os estatutários ingressam nas organizações por meio de concurso público específico para cada função, sem prazo determinado, podem receber gratificações e dificilmente é dispensado, salvo o cometimento de alguma falha grave. Já os celetistas, passam por processos seletivos, contrato por tempo determinado, podem ser demitidos a qualquer momento e podem receber alguns tipos de gratificações, dependendo da função exercida.

Os recursos materiais, de acordo com Saldanha (2014), são adquiridos por meio de licitações que é o “procedimento administrativo mediante o qual a administração pública seleciona a proposta mais vantajosa para o contrato de seu interesse.” Saldanha (2014, p. 140). Após definida a modalidade e escolhido o fornecedor é firmado um contrato o qual garante a negociação entre as partes envolvidas, na qual, por um lado, deve realizar o pagamento e do outro a entrega dos materiais solicitados.

Adquirir recursos na administração pública não é um mero ato de fazer compras ou mesmo um processo seletivo, requer tempo, levantamento de necessidades e de condições de verbas disponíveis para saldar com as dívidas de aquisição ou manutenção do recurso adquirido.

2. Materiais e métodos

A pesquisa realizada teve como foco a apresentação do conhecimento científico, resumida aqui, em forma de artigo. De acordo com Minayo (1993, p. 23), “pesquisa é uma atividade básica das ciências na sua indagação e descoberta da realidade. É uma atitude e uma prática teórica de constante busca que define um processo intrinsecamente inacabado e permanente”. Gil (1999, p. 42) salienta que “a pesquisa é um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico”.

Assim, a pesquisa é o método que se utiliza para buscar soluções para problemas, no qual, através de procedimentos utilizados para a colheita de informações, encontra-se o caminho mais próximo a solução.

O trabalho desenvolvido possui método de abordagem hipotético dedutivo, que, segundo Marconi e Lakatos (2017, p. 110), é trabalhado “partindo das teorias e leis, na maioria das vezes prediz a ocorrência dos fenômenos particulares”, dessa forma, o desenvolvimento se deu com a percepção dos fatos, onde propiciou a formulação do problema.

Na instituição buscaram-se levantar informações sobre o processo de manutenção dos recursos já adquiridos, utilizando-se de informações colhidas através de entrevistas indiretas junto aos usuários, perguntando sobre as condições dos recursos materiais, no que refletia a falta dos recursos danificados. Também completou as informações através da observação das condições, do manuseio dos recursos e das soluções apresentadas para a administração e recuperação dos materiais danificados, seja propositalmente ou através do desgaste natural. A análise dos dados foi pautada na necessidade em buscar a melhor forma de gerenciar os recursos, tornando-os usáveis e evitando assim, o seu descarte.

3. Resultados e discussões

A pesquisa foi desenvolvida em uma escola de cursos técnicos e de qualificação, administrada pelo governo do Estado de Goiás, a qual está em funcionamento há oito anos, seus serviços vêm contribuindo com a sociedade qualificando várias pessoas que não possuem condições financeiras de custear um curso de qualificação, técnico ou tecnológico. Atender toda a comunidade requer recursos e administra-los, adequadamente, é a melhor forma de garantir que haja boas condições de servir ao público. A escola conta com uma instalação capaz de acolher um total de 9.300 alunos, por semestre, distribuídos entre os períodos matutino, vespertino e noturno.

Atendendo aos programas presenciais e a distância do PRONATEC, ETEC Brasil, Bolsa Futuro e outros.

Possui também instalações capazes de receber, com comodidade, toda a comunidade interessada em obter qualificação. Pode-se considerar bem administradas, pois possuem salas de aula amplas com lousas digitais, para uma aula mais dinâmica, quadro branco, TV com CPU acoplada, ar condicionado, carteiras e ar condicionado.

Há também laboratórios de informática, biblioteca com ambiente arejado e boa luminosidade, laboratório de química com equipamentos específicos para amostragens, testes e aulas práticas, assim como outros recursos.

3.1 Recursos humanos

A instituição tem servidores ingressados por meio de concurso público e também de processo seletivo, todos atendem os diversos setores, com o intuito de colaborar e contribuir para o desenvolvimento e aprendizado profissional.

Apresenta um corpo docente que atende as disciplinas ofertadas nos diversos cursos em andamento. Esses são contratados de acordo com o perfil do curso ofertado.

Os servidores administrativos são designados à sua função de acordo com suas qualificações profissionais, para apoiar cada setor com a máxima eficiência possível.

3.2 Recursos materiais

A instituição conta com vários recursos materiais que compõe: As salas de aula; auditório: capacidade para 100 pessoas; laboratório de informática; laboratório de físico – química; biblioteca.

Esses recursos são adquiridos com verbas de programas de apoio financeiro como o PROAFEP – Programa Estadual de Apoio Financeiro à

Educação Profissional, FNDE e própria. Todos os recursos materiais adquiridos, através de verbas de programas, devem ser patrimoniados, listados e apresentados ao setor de patrimônio na secretaria responsável pelo instituto, daí surge a grande dificuldade em gerenciar esses recursos quando apresentam defeitos.

3.3 Gerenciamento dos recursos

A aquisição de recursos é realizada de acordo com a necessidade, pautada por um plano diretor que segue princípios que norteiam a gestão pública e gerida de acordo com processos administrativos estabelecidos em cada ciclo de gestão.

A necessidade de recursos é repassada de ano em ano, levando em consideração o levantamento patrimonial feito no mês de novembro. Nesse levantamento é descrito a quantidade de cada bem que entrou, apresentando suas condições físicas e o estado de uso, são também listados separadamente os recursos que apresentaram alguma quebra ou defeito.

O grande problema enfrentado pela instituição é a administração dos recursos quebrados, sendo uma instituição pública que conta com verbas repassadas pelo Estado, pagar pelo conserto do bem não é algo tão simples, pois não existe uma verba com finalidade específica para manutenção, dessa forma os recursos vão sendo encostado e acabam deteriorando por completo o que às vezes poderia ser uma simples manutenção, como troca ou aperto de parafusos.

Existe na instituição o depósito de quebrados, aonde todos os equipamentos com defeito vão pra lá, lotando a cada dia mais, conforme figura 73:



Figura 73. Foto dos equipamentos danificados

Fonte: Própria.

A existência desse depósito chamou a atenção por conter equipamentos fáceis de serem consertados e voltados para as dependências da instituição e serem usados novamente, mas como foi mostrado no organograma, não há um profissional com essa função, já que a contratação é voltada para as áreas: administrativa, serviços gerais, pedagógico e docência, a área de manutenção nunca existiu.

Não pode ser dito que a culpa de todo esse amontoado de equipamentos seja da administração que não faz nada em prol, pois de tempo em tempo é orientado que tudo seja mandado para um órgão da secretaria que administra a instituição e lá providenciam o conserto, mas enquanto não é encaminhado o tempo cuida de fazer ainda mais o desgaste.

Com base na observação, podem ser percebidos que muitos recursos são possíveis de serem aproveitados, como exemplo uma cadeira que perde o encosto, mas para isso há a necessidade de designar um responsável. A solução estaria em:

- Passar a responsabilidade de cada equipamento para cada setor, ou seja, quebrou ou não está funcionando, fique responsável em usar a planilha, consta um exemplo no apêndice A, contendo dados do equipamento, já que cada um contém um número de patrimônio com as especificações do bem.
- Observar a possibilidade de conserto.
- Passar para o assistente de gestão as informações do bem que necessita de manutenção e se não há conserto, providenciar o mais rápido a entrega ao órgão superior da secretaria para evitar acúmulo no depósito.
- Usar o processo seletivo para a contratação de serviços gerais para trazer para a instituição um profissional que tenha a aptidão em realizar consertos, nesse caso de equipamentos como, mesa, cadeira, armários e outros, o qual tenha, pelo menos, conhecimento básico em marcenaria.
- Equipamentos de informática passariam a ser responsabilidade dos técnicos em evitar ao máximo a inutilização de máquinas sem a devida atenção, realizando sempre manutenção dessas e documentando, através de planilha, conforme apêndice A, a realização da manutenção.

Pode-se inferir que por mais que a instituição tenha boas condições físicas, ela poderia estar melhor, sabendo aproveitar seus recursos que, na maioria das vezes, não tem uma atenção específica da parte de cada setor, sendo que, muitos acham fácil realizar a troca dos equipamentos do que cuidar e aproveitar o que tem, mas não é tão fácil, pois a instituição foi implantada a cerca de oito anos e o número de equipamentos sem manutenção já preocupa.

Esses equipamentos, sem condições de uso, influenciam na realização das atividades diárias, já que os alunos necessitam de cadeiras e carteiras para estudar, laboratórios com equipamentos, os professores também precisam de mesas e cadeiras, os departamentos em geral de mesas, cadeiras, armários, computadores e outros que estão deteriorando por falta de cuidados e manutenção.

Conclusão e recomendações

Este trabalho foi realizado com o intuito de mostrar a situação dos recursos materiais em uma instituição administrada pelo poder público.

Se pode inferir que a administração pública é limitada e deixa a desejar em alguns quesitos e que melhorar essas pendências não é algo tão simples como seria em uma empresa privada.

O gerenciamento e a manutenção dos recursos seguem os princípios que norteiam a administração pública, o que acaba sendo um agente limitante. Alternativas podem ser buscadas no intuito de viabilizar tal uso.

O que se recomenda, como tentativa de melhora, é trabalhar com os recursos disponíveis, passando para os setores a responsabilidade, sendo cada um administrador de seu próprio recurso material, descrevendo através da planilha disponibilizada pelos autores do trabalho, defeito e a possibilidade de conserto imediato, bem como a contratação de servidor serviço geral com a capacidade de atender essa necessidade.

A instituição possui boa capacidade material de atendimento as necessidades da comunidade em relação à educação, isso pode ser visto com a apresentação de suas instalações, mas com o tempo todos os recursos materiais disponíveis vão deteriorando, isso é fato, para minimizar é necessário adotar futuramente, uma manual com maneiras de administrar, otimizando e maximizando a vida útil dos recursos disponíveis.

Referências

- BRASIL. **Constituição a república federativa do Brasil**. 29. ed. São Paulo: Saraiva, 2002.
- CARAVANTES, Geraldo Ronchetti; PANNO, Cláudia C.; KLOECKNER, Mônica C. **Administração: teorias e processos**. São Paulo: Pearson, 2005.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Comportamento organizacional**. São Paulo: Mau Manole Saúde, Técnico J. 2014.

- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- MARCONI, Maria de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia do trabalho científico**: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017
- MAXIMIANO, Antônio César Amaru. **Introdução à administração**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2011.
- MINAYO, Maria Cecília de Souza. **O desafio do conhecimento**. São Paulo: Hucitec, 1993.
- PEREIRA, José Matias. **Manual de gestão pública contemporânea**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- SALDANHA, Clezio. **Introdução à gestão pública**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2014.
- NASCIF, Júlio; KARDEC, Alan. **Manutenção função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitimark, 2001.

Notas

51. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Bolsista CAPES. Contato: janice39@hotmail.com..
52. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: jowal98@hotmail.com.
53. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: karine.adm_bm@yahoo.com.br.
54. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: rodrig_pereira@ yahoo.com.br.

15.

Influência da carga de compressão uniaxial na resistência mecânica de briquetes de calcário

*Victor Hugo Ataíde Borges*⁵⁵

*André Carlos Silva*⁵⁶

*Laís Ferreira Tavares*⁵⁷

*Rita de Cássia Pedrosa Santos*⁵⁸

Resumo: Os finos produzidos pelo processamento do calcário são resíduos do processo cuja viabilização econômica através da briquetagem proporciona redução dos impactos ambientais que seriam proporcionados devido o descarte do material. A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas através de pressão, obtendo-se produtos compactados, com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. O objetivo desse trabalho foi determinar a carga de compressão uniaxial ótima em relação a resistência mecânica dos briquetes, submetendo-os às cargas de 1,5; 3; 6 e 9 toneladas em uma prensa hidráulica no momento de sua fabricação. Como aglomerante, utilizou-se água na proporção de 7,5% em peso. Os briquetes foram submetidos a testes de queda à 30 cm de altura até perderem 5% de sua massa inicial. Melhores resultados foram encontrados para a carga de compressão uniaxial de 6 toneladas, com média de 22 quedas, sendo determinada como a carga ótima para briquetagem do calcário, dentre as analisadas.

Palavras-chave: Briquetes. Finos. Calcário.

Introdução

De acordo com Volkweiss et al. (1995), os solos brasileiros apresentam, em sua maioria, um alto nível de acidez, o que exige sua correção de pH pela calagem, técnica imprescindível para a obtenção de uma colheita abundante. Quando não se utiliza deste método em alguns solos, as culturas podem apresentar rendimentos baixos, inviabilizando economicamente o cultivo.

Devido a excessiva acidez dos solos brasileiros, a utilização do calcário em meio agrícola é um dos principais fins da substância, representando cerca de 21% do total do calcário produzido no Brasil. O uso do calcário protege o ambiente, incrementa a eficiência dos nutrientes e fertilizantes, melhora a efetividade de alguns herbicidas e aumenta a produtividade do cultivo (Silva, 2009).

As rochas carbonáticas, que dão origem ao calcário, são rochas sedimentares de origem química e/ou bioquímica, compostas essencialmente por minerais carbonáticos. Dentre os principais minerais carbonáticos constituintes, se encontram a calcita (CaCO_3), a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e a aragonita (CaCO_3). Além de minerais do grupo dos carbonatos, as rochas carbonáticas também podem apresentar argilominerais, quartzo, minerais fosfáticos, óxidos e sulfetos (Sousa; Vidal, 2005). Nos calcários e mármore, a calcita é o principal constituinte mineralógico (Sampaio; Almeida, 2008).

O calcário agrícola consiste na parte da produção de calcário destinada a aplicação como corretivo do solo. Sua utilização remonta desde a Renascença, com a aplicação de cal (calcário calcinado) para redução da acidez do solo (Silva, 2009).

No Brasil, as reservas lavráveis de calcário representam centenas de anos de produção nos níveis atuais e estão distribuídas por todo o território. Todavia, os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás, se destacam, possuindo quase 60% das reservas medidas de calcário do país, quando somados (Martins Júnior, 2015).

O aumento das atividades agrícolas e de construção civil acarretam um equivalente incremento da indústria de corretivos agrícolas e cimenteira, e por consequência, na exploração de rochas carbonáticas e produção do calcário (Leite, et al., 2003). Juntamente com o aumento da extração do calcário, problemas ambientais relacionados a atividade também apresentaram maior número de incidências (Bacci et al., 2006).

Segundo Nahass e Severino (2003), a agricultura moderna deve considerar o desenvolvimento sustentável, criando e mantendo a produtividade do solo a longo prazo. A agricultura e seus sistemas devem adotar os conceitos de sustentabilidade de forma que os recursos naturais, em destaque o solo e a água, possam ser desfrutados pelas gerações futuras em condições de capacidade produtiva.

Processos de aglomeração são utilizados para o aproveitamento de minérios ou concentrados de granulação fina. Esta técnica evita prejuízos ambientais e proporciona viabilidade econômica aos resíduos do processo (Carvalho; Brinck, 2004).

O processamento do calcário depende do uso final do produto, porém etapas de britagem em estágio unitário e peneiramento são métodos usuais para obtenção dos produtos. A cominuição do calcário pode ser realizada via seca, seguindo etapas de britagem, classificação, moagem em moinhos de rolos tipo Raymond ou em moinhos tubulares com bolas, conforme apresentado na figura 74 (Silva, 2009).

Resíduos particulados com granulometria máxima de 1 μm , além da preocupação ambiental relacionada a sua deposição, dificuldades de manuseio e facilidade de dispersão aérea do material, oferecem riscos à saúde dos colaboradores, especialmente para as vias aéreas, devido o maior contato com o material coloidal. Partículas pequenas ($<1\mu\text{m}$) se comportam como gás na atmosfera e estão sujeitas ao movimento browniano (movimento

aleatório) ficando em suspensão no ar. Desta forma, ressalta-se o quão importante a briquetagem é para a saúde dos colaboradores (Barros, 2016).

A briquetagem é uma técnica de aglomeração de partículas finas que utiliza pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, obtendo-se um produto compactado com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. Provocando a redução de volume do material, este tipo de aglomeração possibilita que os materiais finos sejam transportados e armazenados de forma mais econômica (Carvalho; Brinck, 2010).

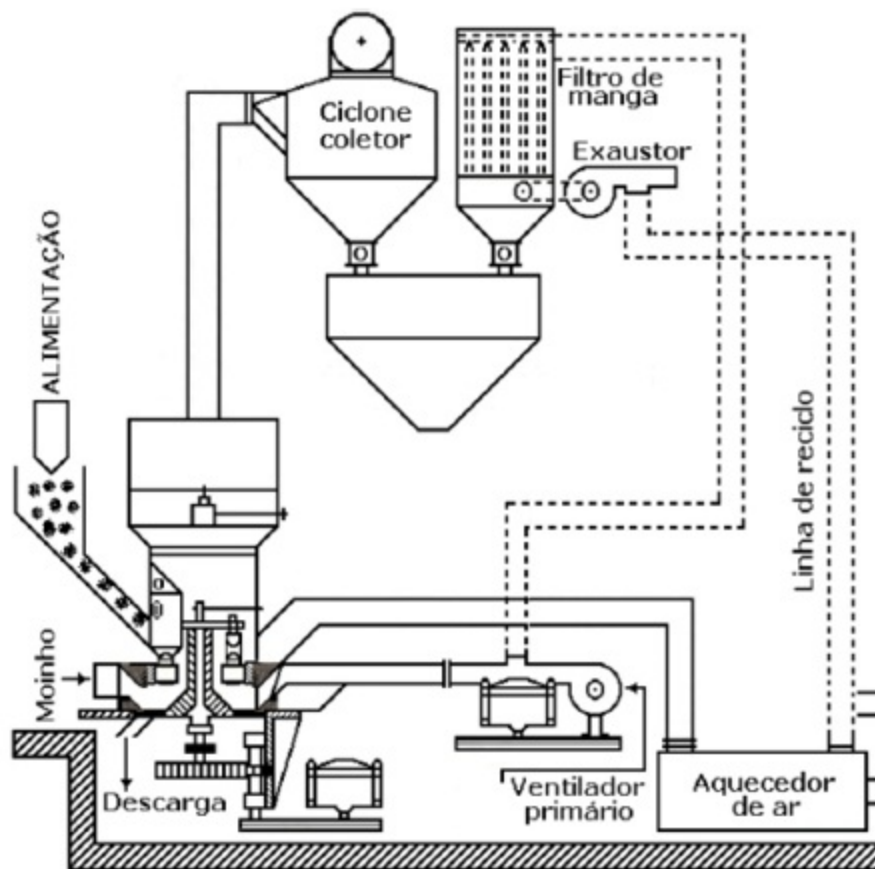


Figura 74. Circuito básico de moagem e classificação de calcário utilizando um moinho Raymond.

Fonte: Sampaio e Almeida, 2008.

A aglomeração de finos de calcário pode possibilitar sua aplicação no meio agrícola na forma de briquetes. Outras possíveis aplicações seriam na

produção de cal virgem, por procedimentos em mufla, e de concreto (Silva et al., 2016).

As atividades de mineração, em sua maioria, geram impactos ambientais e estes podem ser mitigados desde que tecnologias adequadas sejam aplicadas. Os finos produzidos pelo processamento do calcário são resíduos do processo cuja viabilização econômica através da briquetagem proporciona redução dos impactos ambientais que seriam proporcionados devido o descarte do material, sendo este o foco principal desta pesquisa.

1. Revisão da literatura

O calcário utilizado nos experimentos teve sua massa específica determinada através de picnometria por Barros et al. (2016), sendo a análise granulométrica do mesmo realizada por peneiramento a úmido, efetuado em triplicata. Massas de 50 g de calcário foram peneiradas com adição de solução de metassilicato de sódio a 1%. Uma amostra do calcário foi enviada para análise química, realizada pelo Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia. A massa específica encontrada nos ensaios de picnometria foi de 2,765 g/cm³, resultado obtido que pode ser confirmado por valores encontrados na literatura (2,72 a 2,87 g/cm³) (Sampaio; Almeida, 2008).

O material utilizado na pesquisa é proveniente da região de Lagamar, no estado de Minas Gerais.

A tabela 35 apresenta o resultado da análise química da amostra de calcário utilizado nos testes, sendo o mesmo classificado como calcário dolomítico D. A classificação foi obtida baseando-se no teor de óxido de magnésio (Calcítico: < 5% MgO, Dolomítico: ≥ 5% MgO) e o grupo quanto ao Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) - grupo D (>90%) (Barros et al., 2016).



CaO	CaCO ₃	MgO	MgCO ₃	PN	ER	PRNT	Sílica e insolúveis
33,6	59,8	11,1	23,3	100,0	99,6	99,6	Ns

Tabela 35. Análise química dos finos de calcário utilizados

Fonte: Barros et al., 2016.

2. Metodologia

Os experimentos foram executados no Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, utilizando calcário filler (material passante em 0,025 mm) proveniente da região de Lagamar/MG.

Baseado em bibliografia existente, a quantidade de água utilizada para homogeneização do calcário na formação do briquete foi de 7,5% de água em peso (Barros et al., 2015).

Os testes realizados consistiram na quantificação da carga uniaxial aplicada sobre a briquetadeira (figura 75) para a produção dos briquetes com maiores resistências mecânicas.



Figura 75. Briquetadeira utilizada na fabricação dos briquetes

Fonte: Próprio autor.

Para a produção dos briquetes utilizou-se a água como agente

aglomerante e uma massa de 15 g de calcário para cada composição elaborada. Após homogeneização da mistura de calcário e água, a massa resultante foi colocada em uma briquetadeira e aplicou-se uma compressão uniaxial a partir da prensa hidráulica (figura 76), formando o briquete.

As cargas uniaxiais aplicadas foram de 1,5, 3,0, 6,0 e 9,0 t, com tempo de aplicação das cargas para a produção dos briquetes de 5 segundos.



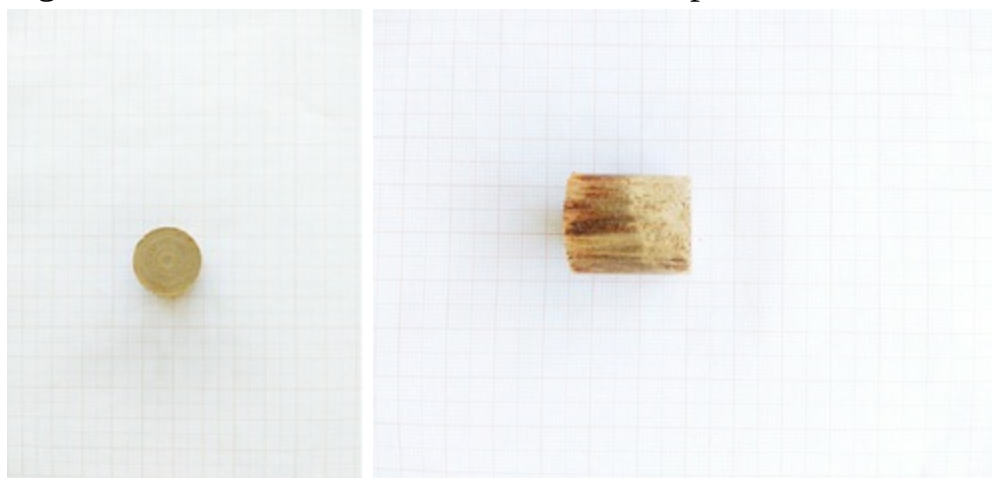
Figura 76. Briquetadeira com a massa de finos de calcário na prensa hidráulica

Fonte: Próprio autor.

Para a pesagem do material, foi utilizada uma balança SHIMADZU. A água foi acrescentada através de pipetas graduadas para garantia da dosagem

correta. Em um béquer de 250 mL foram adicionadas as 15 g de calcário e a dosagem de água. A homogeneização da mistura foi realizada com ajuda de uma espátula.

Após a produção dos briquetes, realizou-se a medição da altura e diâmetro dos mesmos e em seguida os testes de queda. Um exemplar dos briquetes fabricados está na figura 77. O briquete teve seu peso determinado na balança de precisão Shimadzu e posteriormente submetido à queda na altura de 30 cm, sendo este procedimento repetido até que o briquete perdesse 5% de sua massa original. Todos os testes foram feitos em triplicatas.



(a) (a)

Figura 77. (a) vista superior e (b) vista lateral de um briquete de calcário produzido com aplicação de compressão uniaxial

Fonte: Próprio autor.

3. Discussão e resultados

A tabela 36 apresenta os resultados dos testes de queda e dimensões dos briquetes fabricados. Pode-se notar que houve variações mínimas na composição de cada amostra devido imprecisões na etapa de preparação que, todavia, não influenciou nos resultados, já que cada triplicata apresentou resultados semelhantes quanto ao número de quedas.

AMOSTRA	CARGA (T)	ÁGUA (g)	MASSA DE CALCÁRIO (g)	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	MASSA INICIAL (g)	NÚMERO DE QUEDAS A 30 CM PARA PERDER 5% DA MASSA
1	9	1,125	15,000	19,38	22,00	15,250	18
2	9	1,124	15,001	19,36	22,00	15,276	15
3	9	1,126	15,000	19,38	22,02	15,350	17
4	6	1,126	15,000	19,37	22,57	15,145	21
5	6	1,126	15,000	19,36	22,62	15,098	22
6	6	1,126	15,000	19,30	22,49	15,218	23
7	3	1,125	14,999	19,40	24,12	15,460	13
8	3	1,125	15,000	19,31	23,84	15,491	15
9	3	1,125	15,000	19,34	23,62	15,462	13
10	1,5	1,125	15,000	19,50	24,04	15,473	12
11	1,5	1,126	15,000	19,33	24,50	15,461	10
12	1,5	1,124	15,000	19,29	24,60	15,506	11

Tabela 36. Dados dos briquetes produzidos durante a pesquisa

Fonte: Próprio autor.

A figura 78 apresenta a influência da magnitude da carga uniaxial de consolidação aplicada aos finos de calcário durante a fabricação dos briquetes em relação ao número médio de quedas suportadas no testes de quedas. A equação explicitada é referente a curva de tendência dos dados com o respectivo coeficiente de determinação (R^2). O equação escolhida foi determinada a partir do polinômio de menor grau que melhor se adequa aos pontos experimentais.

Analisando a figura 78 pode-se concluir que, dentre as cargas axiais analisadas, a que desenvolve maior resistência mecânica nos briquetes é a de 6 toneladas, visto que os briquetes com maiores números de quedas à 30 cm para perderem 5% da massa foram obtidos com esta aplicação. Esse resultado se encontra de acordo com o trabalho de Barros et. al. (2016), cujo o número

de quedas obtido para os briquetes, com 7,5% de água em massa e fabricados com carga de compressão uniaxial de 6 toneladas, foi de 21 quedas. A resistência mecânica obtida pelos briquetes pode ser considerada ótima, visto que, comparada com a literatura, possui 733% superior ao valor mínimo proposto de 3 quedas à 30 cm (Carvalho; Brinck, 2010).

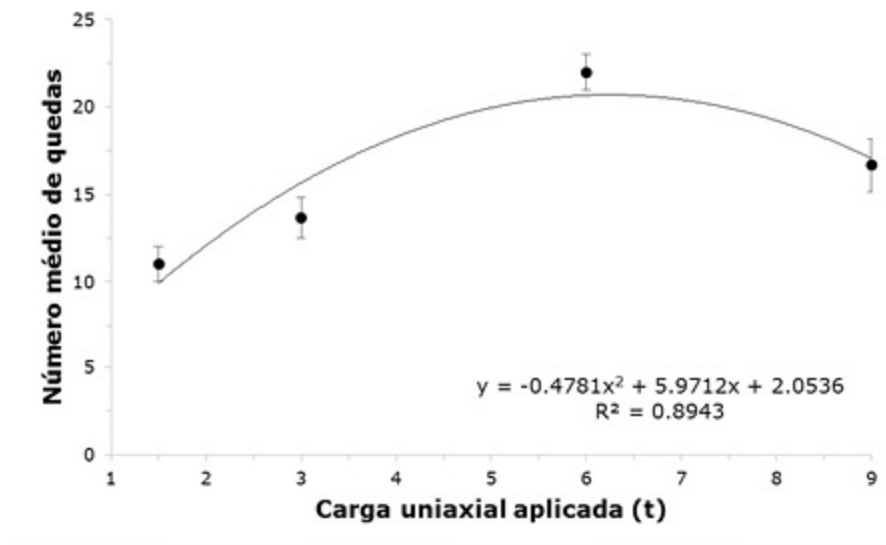


Figura 78. Gráfico comparativo entre a carga aplicada e o número de quedas suportada pelos briquetes

Fonte: Próprio autor.

A figura 79 apresenta a influência da carga de compressão uniaxial aplicada na formação dos briquetes em relação à altura média dos mesmos. A equação apresentada refere-se a curva de tendência dos dados, definida pela função matemática de menor grau que se ajustou aos dados, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2).

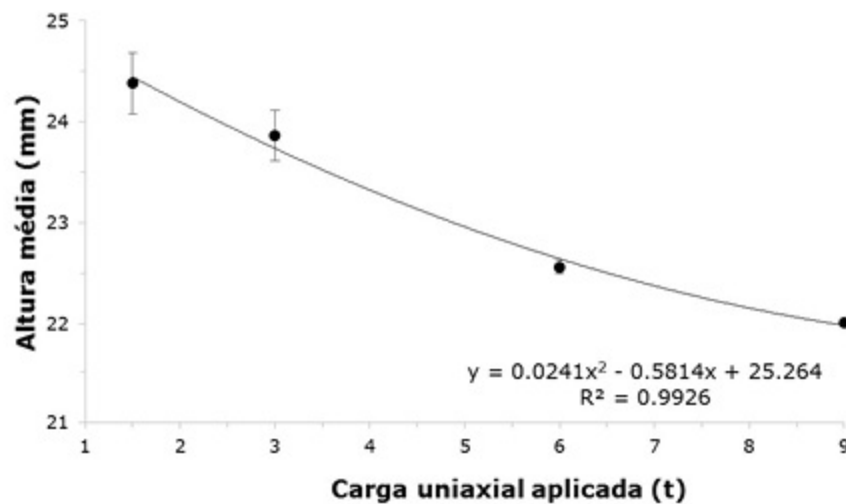


Figura 79. Gráfico comparativo entre a carga aplicada e a altura média dos briquetes

Fonte: Próprio autor.

A partir da análise do gráfico (figura 79), compreende-se que o aumento da carga uniaxial aplicada no briquete implica na diminuição da altura do mesmo. Isso se deve a maior força de compressão, o que provoca maior compactação dos finos na formação dos briquetes, reduzindo os volume de vazios no briquete formado.

Ainda analisando-se as dimensões físicas dos briquetes fabricados, na figura 80 se encontra a relação entre a carga uniaxial aplicada nos finos de calcário para formação dos briquetes e seus respectivos diâmetros médios. Apresenta-se a curva de tendência dos dados, com a equação de menor grau que se ajuste aos dados experimentais, juntamente com seu coeficiente de determinação (R^2).

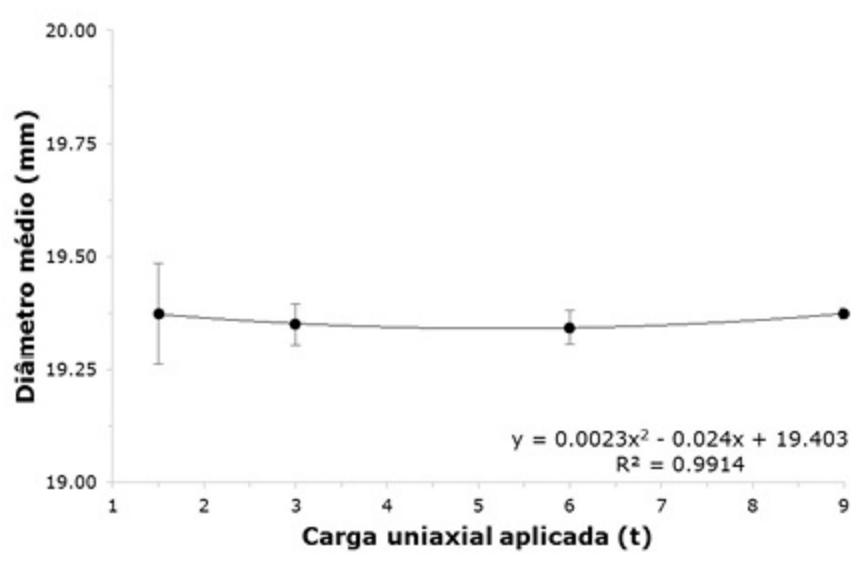


Figura 80. Gráfico comparativo entre a carga aplicada e o diâmetro médio dos briquetes

Fonte: Próprio autor.

O diâmetro dos briquetes, exposto na figura 80, se mantém relativamente estável com a variação de carga. Diante das limitações físicas da briquetadeira para a expansão do diâmetro dos briquetes, este resultado corrobora com o esperado.

Por fim, a última relação analisada se encontra na figura 81, apresentando a relação entre a carga uniaxial aplicada na formação dos briquetes e a massa inicial média dos mesmos, no momento anterior aos testes de queda. A curva de tendência dos dados encontra-se no gráfico juntamente com seu coeficiente de determinação (R^2). A função matemática escolhida corresponde ao polinômio de menor grau que se adeque aos dados obtidos.

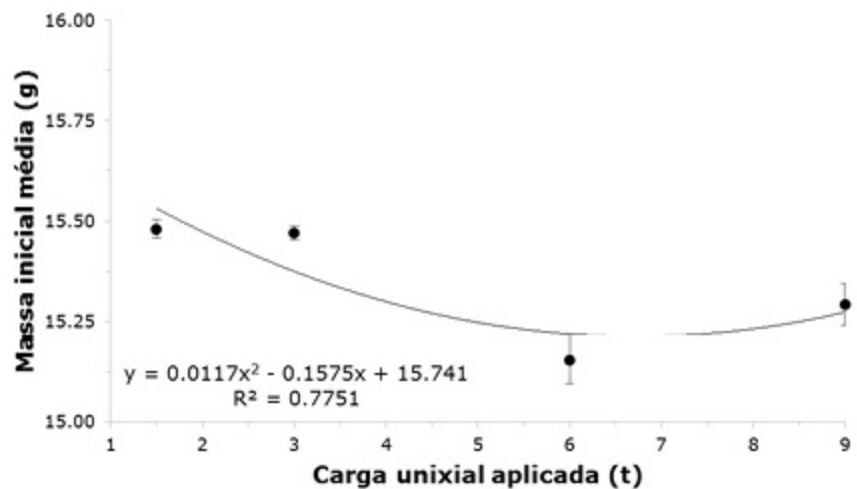


Figura 81. Gráfico comparativo entre a carga aplicada e a massa inicial média dos briquetes

Fonte: Próprio autor.

A massa inicial após a compressão, ilustrado na figura 81, varia de acordo com a força aplicada, tendo valor mínimo, dentre os analisados, na carga de 6 toneladas. A variação da massa inicial dos briquetes não segue uma relação uniforme quando analisado somente a variável da carga uniaxial aplicada, estando relacionada com fatores ambientais no momento da fabricação dos briquetes.

Considerações finais

Para os parâmetros adotados, a carga de compressão de consolidação uniaxial de 6 toneladas garantiu uma maior resistência mecânica aos briquetes, sendo que quando aplicada por 5 segundos, o briquete resistiu em média à 22 quedas de 30 cm de altura para perder 5% de sua massa inicial, com desvio padrão de 1 queda.

A partir dos resultados obtidos e apresentados nos gráficos, nota-se a eficiência do processo de briquetagem de finos de calcário, obtendo briquetes com resistência mecânica satisfatória. Os parâmetros de diâmetro e altura

analisados demonstram o esperado, já que com o aumento de resistência ocorre maior compactação do material. Observa-se ainda que a resistência mecânica do briquete não se incrementa em relação ao aumento da carga uniaxial aplicada e compactação dos finos de calcário.

A definição de uma força axial ótima para a resistência mecânica dos briquetes em um tempo curto de aplicação favorece a aplicação industrial de produção de briquetes em larga escala, gerando um destino econômico aos resíduos e reduzindo o passivo ambiental.

A utilização de água como aglomerante garante a não contaminação do briquete gerado e do local destinado ao seu uso.

É notável que a briquetagem dos finos de calcário é uma técnica eficaz de aglomeração. A água atua como um agente aglomerante satisfatório, e o produto gerado possui viabilidade para utilização em larga escala e redução do passivo ambiental provocado pelo descarte desse resíduo.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CNPq, CAPES, FAPEG e FUNAPE pelo suporte financeiro que possibilitou esta pesquisa. E adicionalmente, à Cala Calcário Lagamar Ind. Comércio por ceder o calcário utilizado no estudo e a Universidade Federal de Goiás.

Referências

- BACCI, Denise de La Corte; LANDIM, Paulo Milton Barbosa; ESTON, Sérgio Médiçi de. Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. **Revista da Escola de Minas de Ouro Preto**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p. 47-54, 2006.
- BARROS, Mariana Rezende de. **Caracterização e avaliação da utilização de aglomerantes orgânicos e inorgânicos na aglomeração de finos de calcário**. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.

- BARROS, Mariana Rezende de; et al. Aproveitamento do Rejeito da Mineração de Calcário Utilizando a Briquetagem como Processo de Aglomeração. In: NEVES, Adriana Freitas; et al. **Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão**. São Paulo: Blucher, 2016.
- _____; et al. Briquetagem de Finos de Calcário. In: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Associação Brasileira de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015. v. 1. p. 590-598.
- CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter. Aglomeração – Parte I: Briquetagem. In: LUZ, Adão Benvindo do; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- _____. Briquetagem. In: LUZ, Adão Benvindo do; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz M. **Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.
- LEITE, Ana Lúcia de S.; SILVA, Cícero Maria G. da; BARBOSA, Robervânia da S. Análise ergonômica no processo da extração de calcário laminado: estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., Ouro Preto, 2003, **Anais...** Ouro Preto, out. 2003, p. 1-7.
- MARTINS JÚNIOR, Fábio Lúcio. **Calcário Agrícola**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Tocantins, 2015. Disponível em: <<http://bit.ly/2OsPkbm>>. Acesso em: 10 set. 2018.
- NAHAS, S.; SEVERINO, J. **Calcário Agrícola no Brasil**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2003.
- SAMPAIO, João A.; ALMEIDA, Salvador Luiz M. de A. Calcário e Dolomito. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas. **Rochas e Minerais Industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, p. 363-391.
- _____. Calcário e Dolomito. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas. **Rochas e Minerais Industriais**: usos e especificação. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.
- SILVA, André Carlos; et al. Reutilização de Finos de Rocha Calcária para Uso Agrícola por Briquetagem. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 13, n. 4, p. 365-372, out./dez. 2016.

- SILVA, José Otávio da. **Perfil do Calcário Agrícola**. J. Mendo Consultoria. [s. l.], 2009.
- SOUSA, José Ferreira de; VIDAL, Francisco Wilson H. Rochas Carbonáticas. Contribuição Técnica elaborada para o Livro Rochas e Minerais Industriais do Ceará. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2005, p. 49-66.
- VOLKWEISS, S. J.; et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1995.

Notas

55. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: victor.ataide@outlook.com.br.
56. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral. Contato:ancarsil@ufg.br.
57. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: lais_ft@hotmail.com.
58. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: rita.pedrosa@ufg.br.

Comparação entre o fio diamantado e tecnologias de corte não diamantadas

Rita de Cássia Pedrosa Santos⁵⁹

Yuri da Vinci Nobre⁶⁰

Victor Hugo Ataíde Borges⁶¹

Nathany Santos Guerino⁶²

Resumo: Com a expansão da demanda por rochas ornamentais, tornou-se necessário um planejamento sistêmico da lavra e das técnicas de extração e beneficiamento de rochas ornamentais, para se obter maior qualidade do produto, menores custos operacionais e maior produtividade. O presente estudo busca comparar o fio diamantado frente a tecnologias de corte tradicionais (*water-jet*, *flame-jet*, fio helicoidal, cortador à corrente, corte contínuo, argamassa expansiva e explosivos), de modo que as demais tecnologias diamantadas (disco diamantado e corrente diamantada) não foram comparadas com o fio diamantado. Os resultados buscam estabelecer uma comparação dos parâmetros técnicos, operacionais, ambientais e de segurança das tecnologias de corte mais usuais. O fio diamantado possui vantagem em relação a outras técnicas de corte em todos os parâmetros analisados, exceto fator de segurança, cujo técnica de *water-jet* possui vantagem, porém, não alterando a superioridade do corte por fio diamantado diante das outras técnicas não diamantadas.

Palavras-chave: Fio diamantado. Parâmetros operacionais. Rochas ornamentais.

Introdução

Por muitos anos a atividade de lavra de rochas ornamentais foi realizada sem critério, com baixa profissionalização e baixa produtividade. Tal prática gerava um grande desperdício de rocha pela geração de resíduos e falta de qualidade no corte.

O Brasil apresenta uma grande vantagem competitiva no setor de rochas ornamentais frente aos seus concorrentes mundiais, devido à sua diversidade de padrões estéticos e potencial geológico de granitos e mármore. Para que seja possível materializar essa vantagem competitiva é necessário investir na modernização da cadeia produtiva, destacando-se a operação de lavra.

Com o crescimento do mercado internacional de rochas ornamentais, tornou-se necessário a elevação do nível tecnológico da cadeia produtiva, afim de atender a demanda e de oferecer um produto em conformidade com as normas internacionais de qualidade. Além disso, normas ambientais foram estabelecidas nas últimas décadas, buscando a diminuição do impacto ambiental decorrente da geração de resíduos.

Elevar o nível tecnológico da cadeia produtiva não significa somente obter maior lucro, mas também oferecer ao mercado um produto em conformidade com as normas internacionais, diminuir o dano ambiental associado à prática da mineração e diminuir o desperdício de matéria prima na lavra. Para tanto, tecnologias de corte que sejam mais precisas e mais rápidas são cada vez mais solicitadas.

Os resultados buscam estabelecer uma comparação dos parâmetros técnicos, operacionais, ambientais e de segurança das tecnologias de corte mais usuais.

1. Desenvolvimento

O crescimento do consumo de rochas ornamentais nas últimas três décadas, colocou o setor de rochas ornamentais como uma das mais importantes áreas de negócios minero-industriais a nível mundial. No Brasil,

a expansão do setor se deu em meados dos anos 2000, com o aquecimento da construção civil, aumentando a demanda por rochas ornamentais e de revestimento. Segundo a Abirochas (2013), no ano de 2015 a produção brasileira de rochas ornamentais superou 9,5 milhões de toneladas, representando uma fatia importante do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. As projeções de consumo, produção e intercâmbio mundial de rochas ornamentais utilizadas na construção civil, não apontam mudanças de padrão, sugerindo a manutenção da tendência de crescimento no consumo de rochas ornamentais, artificiais, para revestimento ou em edificações.

A lavra de rochas ornamentais constitui-se na retirada de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto desta etapa é o bloco de arestas aproximadamente retangulares, com dimensões variadas de modo a atender o melhor aproveitamento do material e a melhor utilização da capacidade produtiva dos teares nas etapas de beneficiamento (Vidal et al., 2013).

1.1 Tecnologias de Corte

Denomina-se de tecnologias de corte os métodos utilizados para a extração de blocos aflorantes de grandes dimensões. Utiliza-se esse método em cortes primários, secundários e esquadrejamento de blocos, em geral através de técnicas combinadas.

De acordo com Chiodi (1995), deve-se analisar aspectos morfológicos, litológicos, estruturais e geográficos das jazidas para a determinação da(s) técnica(s) a serem utilizadas para a lavra de rochas ornamentais. A dimensão desejada dos blocos e fatores econômicos também apresentam relevância para a escolha da tecnologia de corte.

1.1.1 Corte com perfuração e explosivo

Esse método de corte é baseado na utilização de explosivos carregados em furos dispostos próximos e espaçados entre si, de modo a definir o plano de

corte do bloco. Os furos são carregados com dosagens de explosivo extremamente baixas, afim de provocar a ruptura da rocha somente entre os furos. Essa tecnologia encontra-se com seu uso muito abrangente, e por esse motivo é a preferida para a maioria das empresas voltadas à produção de blocos, devido à sua versatilidade e facilidade de execução. Geralmente apresenta custo inferior em relação as técnicas alternativas, para o caso de pedreiras com produção média a baixa (Vidal et al., 2013).

Para a realização dessa técnica, a preferência é pelos explosivos de baixa velocidade de detonação, com velocidade de detonação inferior a 4.000 m/s. O desenvolvimento do gás gerado é capaz de derrubar o volume isolado contra o espaço defronte (face livre). O tamponamento dos furos preenchidos com pólvora é feito por materiais inertes, como areia, britas e argila e sua detonação é feita mediante uso de estopim com ou sem espoletas.

A tecnologia de corte por meio de perfuração e explosivo será ainda por muito tempo utilizada, em função do baixo custo unitário e da flexibilização operacional, para rochas que permitem totalmente sua aplicação (Vidal et al., 2013). Entretanto, a crescente exigência de técnicas de corte que ofereçam maiores níveis de produção, segurança dos trabalhadores e maior qualidade dos cortes cria margens para o desenvolvimento de tecnologias alternativas.

1.1.2 Corte com perfuração contínua

Consiste na realização de furos justapostos, de modo que se obtenha um plano de ruptura contínuo ou interrompido de aberturas fracas o suficiente para permitir um fácil destaque por tração. Segundo Vidal et al. (2013), o processo é realizado em duas etapas, consistindo primeiramente na execução de uma série de furos colineares de 64 mm de diâmetro, coincidente com o plano de corte desejado, com espaçamento próximo ao diâmetro dos furos. Em seguida realiza-se furos intercalados com os furos já existentes, porém

com um diâmetro ligeiramente maior, em torno de 76 mm de diâmetro, de modo a se obter o completo destacamento do bloco rochoso.

Devido às restrições a furos verticais, a técnica requer uma metodologia complementar para a realização da liberação basal do bloco. As técnicas complementares normalmente utilizadas são furos raiados, com explosivos de baixa ou alta velocidade, além do fio diamantado, apresentado como uma das melhores alternativas para os cortes horizontais.

Segundo Alencar et al. (1996), a vantagem da perfuração contínua é sua eficiência operacional, com bom acabamento das faces cortadas e a preservação das características originais da rocha. Por esse motivo, o método é uma opção para substituir o flame-jet para os cortes verticais.

1.1.3 Divisão mediante argamassa expansiva

A argamassa em temperatura ambiente é observada na forma de pó, e após ser misturada à água expande-se, liberando grandes quantidades de energia, de modo progressivo e gradual, promovendo a ruptura da rocha ao longo da linha de furos.

Para a preparação do agente expansivo é necessário somente um recipiente com capacidade compatível com a quantidade de massa que se deseja produzir, o agente expansivo e a água. Segundo Vidal et al. (2013), a proporção da mistura deve ser na proporção de 1 parte de água para 3 partes de pó, ou seja, a cada 10 kg de produto, deve ser adicionado à mistura 3 litros de água. Após a homogeneização, a mistura assume uma aparência cremosa e fluida, devendo ser utilizado logo após a sua preparação.

O furo também deve ser preparado para receber a argamassa. Devem estar limpos, isentos de água e impurezas, sendo preenchidos integralmente e mantidos abertos, exceto em dias chuvosos, exigindo proteção do furo com capas impermeáveis. Para rochas muito porosas ou com temperatura elevada,

é recomendável o umedecimento dos furos para que haja saturação dos poros vazios e a expansão ocorra normalmente nos furos (Pinheiro, 1999).

Após a aplicação, a argamassa expansiva exerce nas paredes do furo uma pressão de expansão, em todas as direções, agindo como um esforço compressivo. As forças dessa compressão induzem a ruptura da rocha por tração. De acordo com Vidal et al. (2013), a pressão de expansão exercida pelo produto chega a 800 kg/cm².

A distância entre furos nos quais se coloca a massa varia em função do diâmetro destes, e do tipo de material a ser cortado ou demolido. A distância entre os furos para a maioria das rochas varia de 30 a 80 cm em função do diâmetro dos furos, que pode variar de 32 mm a 50 mm (Vidal et al., 2013). Nesse sentido, Pinheiro (2003 apud Vidal et al. 2013), ressalta que quanto menor for o espaçamento dos furos e maior seu diâmetro, mais rápido será o processo de corte, obviamente deve-se levar em consideração o tipo de argamassa em função da temperatura ambiente.

A argamassa expansiva é considerada uma tecnologia limpa, não poluidora, não tóxica, de manuseio seguro, silencioso e de fácil emprego, destacando-se principalmente para a segurança dos trabalhadores, comparada ao uso de material explosivo, *flame-jet*, e cunhas mecânicas. Além disso, o método apresenta maior regularidade dos planos de corte, preservação da integridade física-mecânica dos materiais, maior taxa de recuperação, baixo custo e flexibilidade operacional.

1.1.4 Fio helicoidal

A tecnologia de corte por fio helicoidal, aplicada com sucesso no passado, hoje é considerada obsoleta, sendo pouco utilizada, devido sua baixa velocidade e alta geração de resíduos.

O fio helicoidal consiste em três arames de aço trançados helicoidalmente, formando um único fio, com diâmetro externo de 3,0 a 5,0 mm. Sua ação de

corte é baseada no atrito do fio tracionado sobre a rocha, mediante movimento de translação, transportando uma mistura abrasiva constituída de água e areia, que atrita diretamente contra a rocha, provocando a penetração do fio na mesma. Essa mistura abrasiva tem aspecto de lama, devendo manter a proporção em peso de 30% areia e 70% água (Chiodi, 1995; Vidal et al., 2013).

A água tem função de refrigerar o fio, além de facilitar a circulação do abrasivo. Entretanto, para o resfriamento adequado do fio, é necessário que este fique em contato direto com o ar por prolongado tempo, exigindo-se um complexo uso de roldanas e fios longos, da ordem de 800 m a 1600 m, conforme as necessidades de penetração do corte. Já a areia serve como abrasivo, devendo conter alto teor de sílica para melhor abrasão e possuir granulometria entre 0,5 e 1,0 mm (Menezes, 2005; Vidal et al., 2013).

O tensionamento do fio helicoidal é mantido por um equipamento denominado “carro esticador”. Este equipamento é uma vagoneta colocado sobre trilhos em um plano inclinado, que segundo Vidal et al. (2013), possui uma carga variável de 2 a 3 toneladas, vinculada a uma roldana por onde passa o fio. Essa carga é responsável por manter o tensionamento do fio desejado (150 a 250 kg), pois sempre que determinada fração for cortada, a vagoneta andarà um pouco sobre o plano inclinado, mantendo o tensionamento do fio.

1.1.5 Maçarico (Flame-jet)

O *flame-jet* é uma técnica de corte utilizada para o isolamento de volumes primários de rochas mediante uso de maçaricos. O processo de abertura do talho se baseia na desagregação e pulverização mineral, por meio da chama do maçarico que atinge temperaturas muito elevadas. A liberação do bloco ocorre em função dos diferentes coeficientes de dilatação térmica dos minerais, que são “soprados” sob forma de areia. Segundo Vidal et al. (2013), o método é particularmente efetivo para rochas silicosas e homogêneas, como os granitos.

O equipamento consiste em uma lança com um maçarico acoplado à sua extremidade e uma câmara de combustão, revestida de material refratário, na qual são inseridos simultaneamente o comburente (ar comprimido ou oxigênio) e o combustível (querosene ou óleo diesel), produzindo uma chama de temperatura na ordem de 1300° C. De acordo com Vidal et al. (2013), o consumo de óleo diesel é equivalente a 35 litros/hora e a vazão de ar comprimido é de 425 m³/hora.

O método de corte por maçarico apresenta uma série de fatores limitantes à sua utilização, tais como: elevado custo operacional, devido à baixa velocidade de corte e ao elevado consumo de óleo diesel; danificação da rocha, com incidência de microfraturas em até 30 cm nas laterais do corte, dependendo do tipo de rocha, acarretando menor recuperação dos blocos; aplicação somente em rochas graníticas, e mesmo assim apresentando restrições; elevado impacto ambiental, com geração excessiva de ruído (130 a 140 dB), além da produção de gás e poeira; e baixa segurança ao trabalhador, devido ao excesso de ruídos, alta temperatura e perigoso manuseio (Vidal et al., 2013).

1.1.6 Cortadora à corrente

A cortadora à corrente é constituída essencialmente por um “braço”, envolto por uma corrente dentada que gira na periferia do mesmo, direcionando o corte. Segundo Vidal et al. (2013), o braço da cortadora pode ter comprimento variado de 2 a 4 metros, e por esse motivo sua aplicação é em bancadas baixas de calcários e travertinos. O critério de escolha da corrente é estabelecido de acordo com a tenacidade da rocha a ser cortada. Para rochas menos tenazes utilizam-se dentes de metal duro. Já para rochas mais duras, emprega-se dentes diamantados nas correntes, mais arredondados, com menor comprimento, aumentando a robustez (Regadas, 2006; Vidal et al., 2013).

A utilização desse método de corte é proibitiva para granitos, em virtude do desgaste excessivo das ferramentas de corte. A técnica é considerada limpa e relativamente produtiva, com velocidade de corte variável de acordo com a dureza da rocha (Idemburgo, 2012). A velocidade de corte em mármore varia de 2 m²/hora em rochas duras a 12 m²/hora em rochas macias (Vidal et al., 2013).

1.1.7 Corte com água (Water-jet)

O *water-jet* é referente a um processo em que se utiliza um jato d'água de alta pressão para o corte da rocha. Um aparelho chamado monitor forma o jato e controla sua direção. O jato possui velocidades de saída da água de 300 a 500 m/s e a pressão variável entre 150 e 300 MPa, podendo funcionar com água pura ou misturada com abrasivos. Normalmente a distância entre o bico do jato e a rocha é de 10 cm (Chiodi, 1995).

O sistema de corte desta tecnologia é composto por um conjunto de bombas hidráulicas e motor de alimentação de alta pressão, de uma haste que sustenta o bico injetor, além de uma estrutura de suporte e movimentação. A estrutura de suporte serve também como guia da haste, exercendo o controle dos movimentos a serem executados, para gerar movimentos contínuos e repetitivos, uma vez que passadas sucessivas do equipamento geram o corte (Alencar et al., 1996).

A técnica apresenta como vantagem a incidência de menor impacto ambiental por sua utilização, uma vez que reduz a poeira e resíduos gerados; maior segurança dos trabalhadores e redução do custo operacional relacionado à mão de obra. Além disso, outra grande vantagem é a seletividade da tecnologia, que permite extrair blocos diretamente do maciço em qualquer direção de corte. Tal flexibilidade permite se alcançar recuperações próximas de 100%, diminuindo a quantidade de resíduos gerados e aumentando a produtividade do processo (Vidal et al., 2013).

Apesar de todas as vantagens citadas, o método não se tornou o mais utilizado, sobretudo, com a evolução recente do fio diamantado, que permite recuperações muito superiores, à investimento inicial mais baixo. Além disso, o método de corte *water-jet* possui alto custo energético para se obter as pressões necessárias.

1.1.8 Fio diamantado

O desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado decorreu da necessidade de superar as inconveniências técnicas do fio helicoidal. A tecnologia do fio diamantado se inspirou no fio helicoidal para o desenvolvimento dos primeiros equipamentos (Vidal et al., 2013).

Segundo Costa (2009), o princípio básico de corte com fio diamantado é puxar uma alça de fio diamantado, enlaçada na rocha por dois furos coplanares e perpendiculares, que se interceptam nas extremidades. O fio é inserido dentro desses furos com o auxílio de um fio de nylon transportado por ar comprimido e em seguida as duas pontas são emendadas, formando um circuito fechado, e então fio é apoiado em uma polia motriz do equipamento de corte.

Essa polia (volante da máquina de corte) é responsável pelo movimento de translação do fio, cujo tensionamento é aplicado de maneira controlada, por meio do movimento desta, afastando-se ou aproximando-se através de trilhos. Quando a tensão se encontra adequada, inicia-se o movimento de translação do fio em contato com a rocha. Durante o corte, o sistema é alimentado com água no sulco de corte, com a finalidade de refrigerar o fio e remover as partículas provenientes do processo (Costa, 2009).

Segundo Regadas (2006), a técnica é atualmente difundida em todo o mundo, e continua a ser objeto de desenvolvimento e aperfeiçoamento. Os avanços observados nessa técnica têm proporcionado maior velocidade de corte, melhor resultado na interface cortada e uma otimização dos

componentes constituintes do próprio fio diamantado. Costa (2009) acrescenta que o método também possui maior taxa de recuperação, aumenta a qualidade final dos blocos, com níveis de ruído, poeira e vibração reduzidos na operação de corte dos blocos.

2. Metodologia

Consultou-se literaturas diversas como forma de pesquisa bibliográfica, incluindo artigos, documentos, dissertações e organizações do setor de rochas ornamentais, para a coleta de dados sobre as diversas tecnologias de corte, possibilitando a posterior comparação entre as variadas alternativas levantadas. As obras consultadas foram obtidas através de meio eletrônico, bibliotecas públicas e particulares, e anais de eventos.

Para a comparação entre o fio diamantado e as demais tecnologias de corte, os dados obtidos através da pesquisa foram organizados na forma de gráficos e tabelas de modo a facilitar a análise comparativa.

3. Discussão e resultados

Para o início da comparação entre as tecnologias de corte, é importante ressaltar que determinados métodos são mais apropriados para determinadas condições, tendo sua escolha limitada também pelo tipo de rocha, condicionantes geométricos e das restrições operacionais de cada método.

Na Figura 82 são confrontadas as principais tecnologias utilizadas para a realização da lavra de um granito duro. Os dados utilizados (figura 82) foram extraídos da literatura e adaptados em forma de gráfico, sendo referentes a produção em um granito duro.

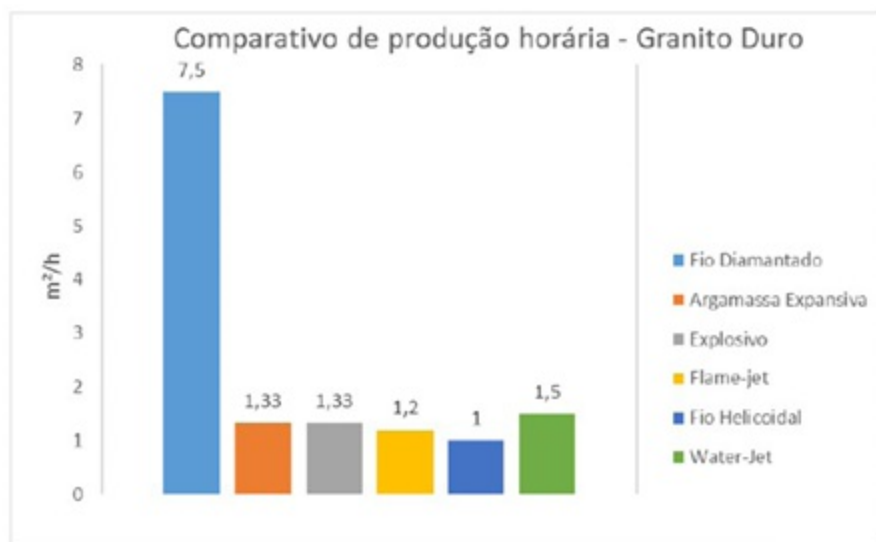


Figura 82. Produção horária em um granito duro das tecnologias de corte mais comuns

Fonte: Adaptado de Regadas, 2006 e Vidal et al., 2013.

Na comparação do figura 82 é possível observar a superioridade do fio diamantado em relação as demais tecnologias, com velocidade de produção em média 80% maior que as tecnologias não diamantadas.

O que confere esse desempenho superior ao fio diamantado é seu elemento cortante, a pérola, que é constituída por uma pasta diamantada sobre um suporte cilíndrico. A pasta composta por diamantes, elemento com maior dureza na Escala de Mohs, é o elemento abrasivo responsável por riscar a rocha, gerando o corte.

Atualmente, figuram como as tecnologias de corte mais utilizadas para granitos e outras rochas duras, o fio diamantado, o explosivo e a argamassa expansiva. Dentre estas tecnologias, o fio diamantado tem obtido destaque do ponto de vista econômico, pois a nacionalização da produção diminuiu os preços de comercialização do produto e a evolução na tecnologia conferiu maior durabilidade nas pérolas. Além disso, atualmente existem diversas opções de fios diamantados, permitindo a escolha do mais apropriado para

cada tipo de litologia, o que também gera ganhos em performance – e consequentemente diminuindo o custo de operação. Na figura 83, realiza-se a comparação dos custos de operação envolvidos em cada um desses principais métodos.

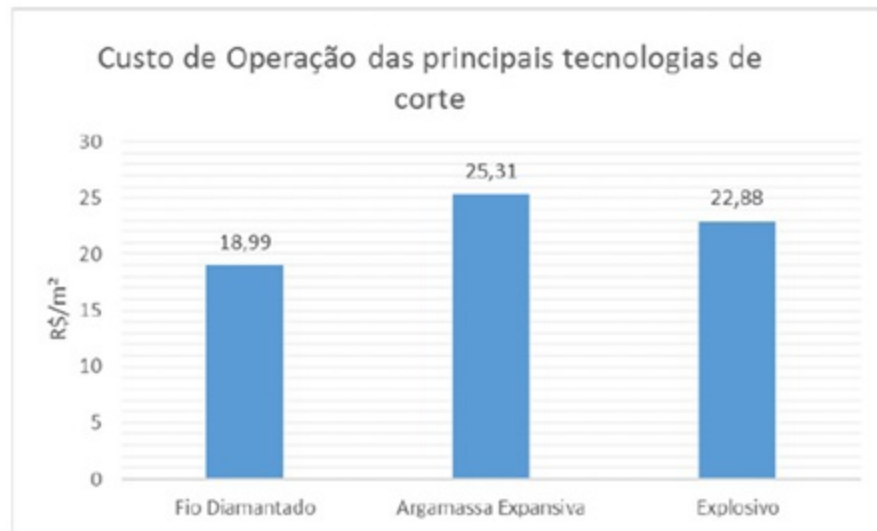


Figura 83. Custos de operação para um granito duro para tecnologias de corte mais utilizadas para rochas duras

Fonte: Adaptado de Vidal et al., 2013.

Na figura 83 é possível observar que para cada metro quadrado de rocha cortada no ano de 2013, o custo era de aproximadamente R\$ 19,00. É importante entender que, apesar do custo por metro quadrado do fio diamantado ser menor que as outras tecnologias, o custo de produção horária do fio diamantado é superior aos outros métodos, uma vez que tal tecnologia realiza o corte de maior área por hora.

Para minas de rochas carbonáticas (mármore), geralmente emprega-se tecnologias de corte contínuo, tais como fio helicoidal, cortador a corrente de metal duro e tecnologias diamantadas, como corrente diamantada e fio diamantado. Contudo, nesse estudo, objetivou-se comparar o fio diamantado com as tecnologias de corte não diamantadas. Portanto, não foram analisados dados de outras tecnologias diamantadas.

A tecnologia flame-jet não foi comparada, uma vez que não é apropriada para esse tipo de rocha, devido ao seu mecanismo de corte. Tal mecanismo se trata da desagregação dos grãos devido às diferentes temperaturas de dilatação de cada mineral, promovendo a desagregação por crepitação, de acordo com as superfícies cristalográficas. Por esse motivo, a aplicação do flame-jet está restrita às rochas plutônicas.

A figura 84 compara as principais tecnologias de corte contínuo utilizadas para a lavra de mármore.

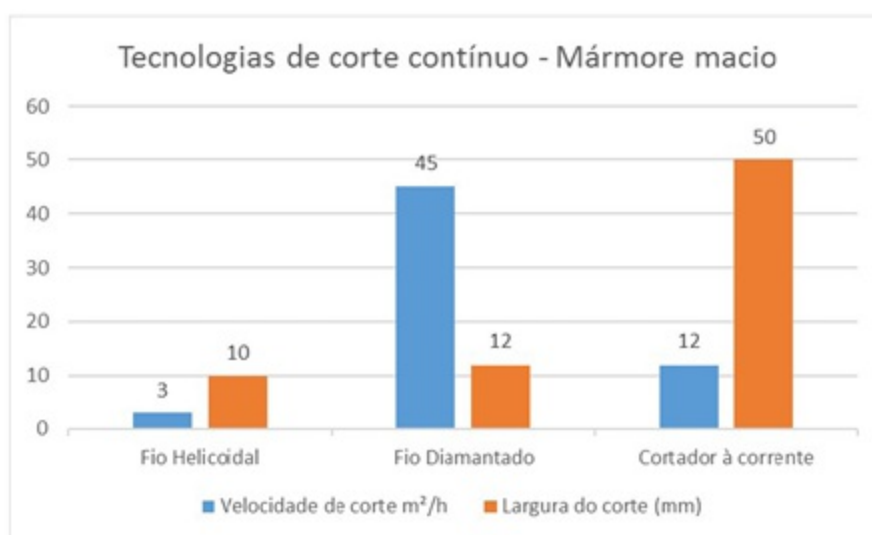


Figura 84. Parâmetros das principais tecnologias de corte contínuo para mármore

Fonte: Adaptado de Vidal et al., 2013.

Através da análise da figura 84, é possível observar que o fio diamantado gera um corte ligeiramente mais largo que o fio helicoidal, uma vez que o fio helicoidal tem menor diâmetro (6 mm contra 10 mm do fio diamantado). Por outro lado, o cortador à corrente gera um corte com largura aproximadamente cinco vezes maior que estas tecnologias, ocasionando grande desperdício de material.

Já a velocidade de corte do fio diamantado é muito superior em relação a velocidade do fio helicoidal, revelando a obsolescência desta tecnologia. No

gráfico é possível observar uma variação em torno de 90% na velocidade de corte do fio diamantado em relação ao fio helicoidal. Confrontando o fio diamantado com o cortador à corrente, tem-se uma variação positiva para o fio diamantado de 73%. Desse modo, dentre as tecnologias de corte contínuo utilizadas para lavra em mármore, o fio diamantado se destaca em termos técnicos.

Conclusões

A partir do conteúdo estudado, foi possível a construção de um quadro (Tabela 37), contendo uma síntese dos principais parâmetros levados em conta na avaliação da escolha da tecnologia de corte. Vale ressaltar que nesse estudo não se levou em consideração o valor de aquisição dos equipamentos (CAPEX) em cada tecnologia, uma vez que seria necessário um estudo orçamentário, de depreciação e de vida útil do equipamento, distanciando do objetivo proposto na pesquisa.

Tecnologia	Comparação dos parâmetros operacionais					
	Custos Oper./m ²	Taxa de produção	Flexibilidade de operação	Geração de Resíduos	Nível de Ruído	Fator de segurança
Flame-jet	1	2	1	1	1	2
Perfuração+ explosivo	3	2	4	2	1	2
Perfuração + Massa expansiva	3	2	1	4	2	2
Perfuração contínua	3	2	2	2	2	4
Fio helicoidal	2	2	1	3	4	2
Fio diamantado	4	4	4	4	4	3
Water-jet	2	2	4	4	4	4

Tabela 37. Comparação das tecnologias de corte de rochas ornamentais duras

Fonte: Adaptado de Vidal et al., 2013.

Legenda: Desempenho relativo (4-Ótimo, 3-Bom, 2-Ruim, 1-Limitante).

As notas de desempenho relativo do quadro são referentes ao confronto de cada tecnologia de corte em relação a(s) que obteve desempenho ótimo. O desempenho “limitante” é referente às condições que limitam a utilização de tal tecnologia por este parâmetro. Tal limitação pode ser referente à alto custo, degradação ambiental ou até mesmo fora do permitido pela legislação.

A partir da análise da tabela 37, torna-se mais clara a diferenciação de cada parâmetro das diferentes tecnologias de corte estudadas no presente estudo. Observa-se a vantagem do fio diamantado em praticamente todos os parâmetros, exceto em fator de segurança. Isto decorre do fato do fio diamantado, quando em funcionamento, oferecer risco de acidentes mais elevados em relação ao *water-jet* – tecnologia com melhor desempenho em segurança. Tal risco está associado ao fato do fio diamantado realizar sua rotação sem qualquer proteção para o trabalhador.

Por outro lado, as demais tecnologias de corte não demonstraram resultados operacionais tão constantes e satisfatórios como o fio diamantado. As tecnologias do jato d’água (*water-jet*) e argamassa expansiva até obtiveram desempenho “ótimo” em geração de resíduos, porém, os parâmetros operacionais foram inferiores, uma vez que as taxas de produção obtiveram desempenho “ruim” frente ao fio diamantado, além do custo de operação ter sido superior.

Em resumo, as vantagens do fio diamantado em relação as outras tecnologias, segundo os autores estudados e os resultados obtidos são: não há dano para rocha no processo de lavra; espessura média de corte muito estreito, tendo uma perda praticamente insignificante no processo de corte; regularidade nas superfícies cortadas; obtém-se maior volume de blocos

comercializáveis, melhorando os ganhos; elevada velocidade de corte, com alta produtividade; menor custo unitário de corte, frente as demais tecnologias de corte; melhor relação custo-benefício; versatilidade de uso para diversas condições operacionais; atividade com baixa emissão de ruído, poeira e vibrações, contribuindo para as condições dignas de trabalho para os colaboradores; a tecnologia de corte com fio diamantado permite a organização do trabalho de lavra, através de um planejamento estratégico da atividade extrativa, trazendo uma otimização para o ciclo de produção de uma pedreira.

Os resultados obtidos mostram a vantagem do fio diamantado em relação a outras técnicas no que concerne a geração de resíduos, tempo necessário para realizar o corte, custo operacional, regularidade do corte, segurança para o trabalhador (incluindo a saúde ocupacional). Entretanto, o estudo não comparou o fio diamantado frente a outras tecnologias diamantadas (disco diamantado e corrente diamantado), não esgotando os resultados possíveis para as comparações entre as tecnologias de corte. O estudo também não tem a intenção de generalizar a utilização do fio diamantado, uma vez que os resultados obtidos são referentes à mármore e granitos, contudo a tendência é de que se mantenham as características de cortes quando utilizadas em outras rochas ornamentais.

Portanto, o presente trabalho alcançou os objetivos propostos, uma vez que proporcionou o estudo das tecnologias de corte, bem como a comparação dos parâmetros técnicos, econômicos, de segurança e ambientais. A partir do estudo realizado, evidenciou-se as vantagens do fio diamantado em relação as tecnologias de corte não diamantadas.

Referências

ALENCAR, Carlos Rubens A.; CARANASSIOS, Adriano; CARVALHO, Denilson. **Tecnologias de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais**, v. 3. Fortaleza: IEL/FIEC, 1996.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor de rochas ornamentais e de revestimento situação atual, demandas e perspectivas frente ao novo marco regulatório da mineração brasileira.** São Paulo: 2013.
- CHIODI FILHO, Cid. **Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais.** Rio de Janeiro: CNPq/CETEM, 1995. (Série Estudos e Documentos).
- COSTA, Bruno Muniz. **Avaliação qualitativa das metodologias de lavra utilizadas na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua – RJ.** 2009. 59 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- IDEMBURGO, Karina. **Estudo do corte de rochas ornamentais utilizando disco diamantado.** 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MENEZES, Ricardo Gallart de. **Tecnologias de lavra em maciços rochosos.** 2005. 48 f. Monografia (Especialização em Rochas ornamentais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PINHEIRO, J. R. O emprego da argamassa expansiva na extração de rochas Ornamentais. **Rochas de Qualidade**, v. 28, n. 145, , p. 96-108, mar./abr. 1999.
- REGADAS, Isaura Clotilde M. da Costa. **Aspectos relacionais às lavras de granitos ornamentais com fio diamantado no norte do estado do Espírito Santo.** 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- VIDAL, Francisco W. Holanda; et al. Lavra de Rochas ornamentais. In: _____. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013, p. 153-258.

Notas

59. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: rita.pedrosa@ufg.br.
60. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: nobre.yuri@gmail.com.
61. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: victor.ataide@outlook.com.br.

62. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: nathanyguerino@hotmail.com.

Evolução do fio diamantado como tecnologia de corte na lavra de rochas ornamentais

*Rita de Cássia Pedrosa Santos*⁶³

*Yuri da Vinci Nobre*⁶⁴

*Victor Hugo Ataíde Borges*⁶⁵

*Cibele Tunussi*⁶⁶

Resumo: A escolha da tecnologia de corte mais adequada na lavra de rochas ornamentais é fundamental para o sucesso do empreendimento, uma vez que esta definirá os custos operacionais para o resto da vida útil da jazida e a qualidade dos blocos extraídos, bem como o impacto ambiental gerado. Diante desse cenário, tecnologias inovadoras têm sido requisitadas para que se obtenha maiores velocidades de corte por um custo reduzido. O objetivo desse trabalho é estudar uma dessas tecnologias inovadoras: o fio diamantado, utilizado como técnica de corte de rochas ornamentais. Os resultados mostram a evolução do fio diamantado nas últimas duas décadas. Os critérios analisados na evolução desta técnica de corte envolvem a velocidade do fio, a potência instalada, a velocidade de corte em mármore e granitos, e a utilização de água no processo de corte.

Palavras-chave: Fio diamantado. Parâmetros operacionais. Rochas ornamentais.

Introdução

Com a expansão da demanda por rochas ornamentais, tornou-se necessário um planejamento sistêmico da lavra e das técnicas de extração e

beneficiamento de rochas ornamentais, para se obter maior qualidade do produto, menores custos operacionais e maior produtividade. O advento das ferramentas diamantadas se deu para suprir essa necessidade, sendo um marco importante na produção de rochas ornamentais, tanto do ponto de vista de qualidade dos produtos, como do ponto de vista econômico. Em particular, o fio diamantado é a tecnologia diamantada mais difundida no Brasil, especialmente pela nacionalização da produção dos componentes dessa tecnologia, permitindo sua rápida evolução e menor custo final.

Com a utilização do fio diamantado, as pedreiras de rochas ornamentais têm apresentado aumento significativo na extração de blocos, podendo atender a demanda do mercado. Tal aumento se deve a elevada produtividade do fio diamantado, conseguindo cortar grandes blocos em poucas horas. Outros fatores favoráveis à utilização do fio diamantado são a diminuição da intensidade de ruído, de vibrações e diminuição na geração de resíduos (pó de rocha). Tais características conferem ao colaborador condições mais adequadas de trabalho, além de gerar menor impacto ambiental com a atividade de extração.

Este trabalho busca conceituar rochas ornamentais, descrevendo e classificando os diversos grupos. Mostrar o cenário econômico e produtivo a nível nacional e mundial, mostrando ainda projeções futuras para o setor.

Os resultados buscam estabelecer uma comparação dos parâmetros operacionais do fio diamantado durante sua evolução, bem como seu progresso quanto a fatores ambientais e técnicos. Utilizando-se de análise da literatura, os resultados são exibidos de forma gráfica e explanadas em seguida.

1. Desenvolvimento

A lavra de rochas ornamentais constitui-se na retirada de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões. O

produto desta etapa é o bloco de arestas aproximadamente retangulares, com dimensões variadas de modo a atender o melhor aproveitamento do material e a melhor utilização da capacidade produtiva dos teares nas etapas de beneficiamento (Vidal et al., 2013).

Segundo Vidal et al. (2013), a maior parte das rochas ornamentais, especialmente as de revestimento – rochas submetidas a diferentes graus ou tipos de beneficiamento (ABNT, 2013) – são obtidas em grandes blocos, com volumes de 8 a 12 m³, sendo posteriormente desdobradas em chapas, que após o polimento serão vendidas para serem transformadas no produto final por marmorarias.

A lavra de rochas ornamentais pode ser realizada em lavra superficial e lavra subterrânea. A lavra superficial, porém, ocorre com maior frequência e é ainda dividida em lavra de matacões e lavra de maciços rochosos.

Matacões são corpos arredondados de rochas que foram deslocadas do maciço, por erosão e irregularidades de tamanho e de distribuição espacial. O processo de lavra de matacões consiste em retirar blocos comercializáveis do corpo que se encontra deslocado em relação ao maciço. Já a lavra de maciço, como o próprio nome indica, consiste em lavrar blocos diretamente no maciço rochoso (conjunto formado pela matriz rochosa e por todas as descontinuidades nela contida). Posteriormente esses tipos de lavra serão detalhados.

O método de lavra empregado definirá a vida útil de uma jazida, o tamanho dos equipamentos e com isso a viabilidade do empreendimento. Uma escolha equivocada do método de lavra pode definir o sucesso ou não do empreendimento. De modo geral, a duração das atividades de lavra em uma jazida deve ser superior ao período necessário para amortizar os equipamentos empregados. Segundo Alencar et al. (1996), a escolha do método de lavra deve levar em consideração a morfologia dos afloramentos,

o volume da reserva, seu estado de fraturamento, localização geográfica das áreas e das características intrínsecas do material objeto da exploração.

Para Vidal et al. (2013, p. 163),

“o segmento extrativo se encontra em um estágio de amadurecimento no Brasil, tendo incorporado a evolução tecnológica do setor e modificando e aperfeiçoando os métodos de lavra ao longo do tempo, de acordo com utilizações que se tornam cada vez mais específicas e especializadas”.

Os autores acima citados ainda afirmam que a variedade litológica brasileira, permitiu que os produtores dessa região se tornassem grandes conhecedores da aplicação das diversas tecnologias de corte a materiais considerados “duros”, como são as maiorias das rochas silicatadas.

Os métodos de lavra também tiveram rápida evolução, tanto pela necessidade de aumento de produção, puxada pela demanda do mercado internacional, quanto pelas evoluções das tecnologias de corte. Pode-se ainda levar em consideração o recente endurecimento das leis ambientais, provocando nos empresários do ramo uma busca por métodos de lavra menos prejudiciais ao meio ambiente.

Os autores Vidal et al. (2013) e Reis e Sousa (2003) definem que os principais métodos de lavras utilizados na atualidade são: lavra de matacões, lavra por desabamento (desmoronamento), lavra seletiva, lavra de bancadas altas ou baixas, lavras de painéis verticais e lavra subterrânea.

A Figura 85 sumariza de forma esquemática os métodos de lavra de rochas ornamentais mais utilizados e que serão abordados no próximo tópico.



Figura 85. Métodos de lavra de rochas ornamentais

Fonte: Chiodi, 1995.

1.1 Tecnologias de corte

As tecnologias de extração, também chamadas de tecnologias de corte, compreendem os procedimentos de liberação de grandes volumes de rochas aflorantes. Utiliza-se esse método em cortes primários, secundários e esquadrejamento de blocos, em geral através de técnicas combinadas.

Segundo Chiodi (1995), o estabelecimento de uma técnica ou conjunto de técnicas para desmonte de rochas ornamentais é dado pela análise das características morfológicas, litológicas, estruturas e geográficas da jazida, além da dimensão mínima dos blocos desejados e dos fatores econômicos.

A definição do quadrote, quando é possível é definida pela existência de planos naturais de fraqueza das rochas, afim de se obter facilidades operacionais, minimizando os custos.

Planos configurados por foliação, laminação ou fraturas são mais fáceis para as operações de corte, pois constituem os chamados planos de “corrida” ou alongante” das rochas. Por sua vez, as faces longitudinais apresentam maior dificuldade de corte, são comumente definidas como planos do

“segundo” ou de “levante”, localizado transversalmente aos ângulos de corrida (Menezes, 2005).

O tamanho de um bloco, obtido a partir do esquadreamento de volumes primários ou secundários, será determinado pelas dimensões dos equipamentos a qual se destina, comumente os teares multilâminas, onde passam por uma etapa de beneficiamento, sendo desdobrado em várias chapas de 2 cm a 3 cm de espessura.

As técnicas de corte, assim como os métodos de lavram influenciam diretamente na geração de rejeito e na poluição ambiental. Por esse motivo, é fundamental o estudo prévio da tecnologia que se deseja implementar, contribuindo para a conservação ambiental e para o uso consciente dos recursos minerais. Para atingir o patamar de produtividade e produção limpa, o setor tem sido aprimorado com o passar dos anos, oferecendo alternativas operacionais cada vez mais específicas e otimizadas.

As metodologias de corte podem ser divididas em tecnologias de corte contínuo e tecnologias cíclicas, também chamadas de cortes em costura.

1.1.1 Tecnologias cíclicas

São tecnologias caracterizadas pela realização de cortes através de procedimento operacional sucessivo e repetitivo, constituindo fases do ciclo de produção, podendo ou não serem compostas com outras técnicas para a sua complementação. Essas tecnologias baseiam-se, principalmente, na técnica de perfuração e são caracterizadas por uma grande versatilidade e poder de adaptação em situações de atividades extrativas.

As tecnologias cíclicas são:

- Divisão mecânica com cunhas;
- Corte com perfuração e explosivo;
- Corte com perfuração contínua;
- Divisão mediante argamassa expansiva.

1.1.2 Tecnologias de corte contínuo

As tecnologias de corte contínuo constituem-se basicamente operações efetuadas em uma única operação de corte, sem envolvimento de técnicas combinadas complementares para execução do talho. Estas tecnologias não tem o uso predominante de perfurações ou explosivos em sua operação.

As técnicas usuais de corte contínuo são:

- Fio helicoidal;
- Maçarico (*flame-jet*);
- Cortador à corrente;
- Corte com água (*water-jet*);
- Tecnologias diamantadas.

1.1.2.1 Fio diamantado

O desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado decorreu da necessidade de superar as inconveniências técnicas do fio helicoidal. A tecnologia do fio diamantado se inspirou no fio helicoidal para o desenvolvimento dos primeiros equipamentos (Vidal et al., 2013).

Segundo Regadas (2006), os aprimoramentos no fio diamantado têm garantido maior velocidade de corte, melhor resultado na interface cortada e uma otimização dos componentes constituintes do próprio fio diamantado. De acordo com Costa (2009), melhorias ambientais quanto a redução da geração de ruídos, poeira e vibração, além de maior taxa de recuperação e qualidade final dos blocos são avanços alcançados no método.

A tecnologia de corte com fio diamantado tem sido largamente utilizada nas pedreiras de rochas ornamentais, consagrando-se como a solução para lavras de rochas carbonáticas e silicáticas em maciços rochosos. Além disso, a técnica também é utilizada em casos onde os matacões possuem grandes volumes.

Essa tecnologia possui fácil empregabilidade e bons resultados operacionais e econômicos. Porém, sua utilização requer treinamento técnico-

operacional, além de conhecimento geológico, pois a presença condições geológicas reinantes no maciço rochoso, em especial as tensões internas, podem afetar o desempenho dessa tecnologia.

Para Costa (2009, p. 27), “o fio diamantado é composto por um cabo de aço com 5 mm de diâmetro, montado com ferramentas diamantadas denominadas pérolas, cujo diâmetro é normalmente de 10 a 11 mm”. Essas pérolas são regularmente espaçadas de forma variável, de acordo com o tipo de rocha a ser lavrado.

Geralmente o comprimento do fio diamantado está compreendido entre 50 e 70 metros. A montagem do fio diamantado obedece uma frequência de 29 a 35 pérolas/metro quando utilizada em mármore e 39 a 41 pérolas/metro quando utilizada para corte em granitos. Tal variação se dá pela diferença de dureza existente entre os tipos de rochas (Regadas, 2006). Os granitos por serem rochas silicáticas possuem maior dureza e, portanto, é necessária maior abrasão para manter a produtividade.

Segundo Monteiro (2014), os cabos de aço são constituídos por três componentes estruturais básicos: o núcleo (alma), os filamentos (perna) e o arame. Por norma, os arames devem ser enrolados helicoidalmente em torno do arame que se situa no centro do filamento, de modo que seja formado o próprio filamento. Então os filamentos formados são enrolados helicoidalmente no núcleo (alma), concebendo o cabo de aço.

As pérolas diamantadas são mantidas separadas por separadores adequados a sua finalidade, sendo atualmente três configurações possíveis: molas metálicas, revestimento de material plástico ou de borracha (Figuras 86, 87 e 88). Além de separação das pérolas diamantadas, esses revestimentos têm função de proteção do cabo de aço (Monteiro, 2014).



Figura 86. Fio diamantado revestido com molas metálicas

Fonte: Monteiro, 2014.



Figura 87. Fio diamantado revestido com plástico

Fonte: Monteiro, 2014.



Figura 88. Fio diamantado revestido com borracha

Fonte: Monteiro, 2014.

Os revestimentos por molas foram os primeiros a serem utilizados para manter o espaçamento, além de absorver os choques do fio contra a rocha. Porém, sua deterioração precoce fez com que seu uso fosse muito minimizado. Os revestimentos de plástico vieram com a intenção de evitar desgaste excessivo do cabo de aço, em função da maior abrasividade encontrada nos granitos.

Com o avanço das tecnologias pôde-se chegar aos revestimentos vulcanizados, feitos com borracha. A técnica cria um único componente interligado, porém torna o cabo mais flexível.

As pérolas por sua vez, são constituídas por um anel metálico (aço) que suporta um conjunto de segmentos diamantados (pasta diamantada), que são compostos por uma liga metálica impregnada de grãos de diamante e são essas as peças responsáveis pelo corte. A pérola diamantada (figura 5) pode ter diâmetro externo variável de 10,0 mm até 11,5 mm e comprimento de 6,0 mm. Esse diâmetro externo vai diminuindo a medida que as pérolas vão sendo desgastadas, até que o diâmetro externo fique próximo ao valor do diâmetro interno (7 mm). Nesse momento, a pasta diamantada se esgotou,

tendo atingido o anel metálico, sendo requerido a sua substituição (Regadas, 2006).

Os diamantes utilizados para a fabricação das pérolas diamantadas podem ser de origem natural ou sintética. Os diamantes de origem natural devem passar por um processo de purificação, em seguida devem ser processados e classificados. Já os diamantes sintéticos são obtidos a partir da exposição do grafite a altas pressões e temperaturas. Com a aplicação em escala industrial, tem sido possível nos últimos anos a obtenção do diamante sintético por um preço atrativo. Ressalta-se que o diamante é o mineral mais duro que existe, com dureza 10 na escala de Mohs.

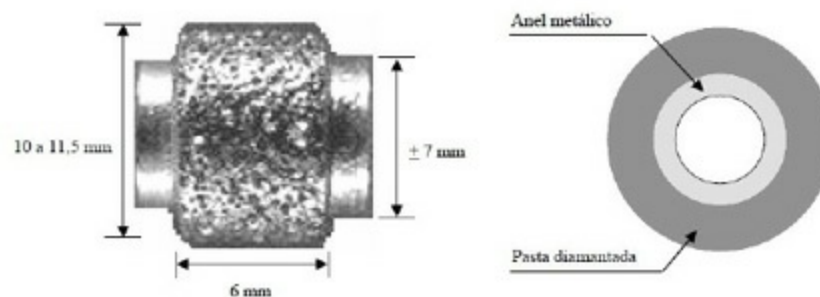


Figura 89. Detalhe do formato da pérola diamantada

Fonte: Caranassios e Pinheiro, 2004 apud Regadas, 2006, p. 58.

2. Metodologia / procedimentos utilizados

Na pesquisa bibliográfica foram consultadas diversas literaturas que abordam o tema de estudo. Analisou-se obras com uma diferença considerável de data de publicação a fim de se obter dados para análise comparativa e descrição da evolução do fio diamantado.

Os dados obtidos foram organizados em gráficos e tabelas para a comparação do desempenho do fio diamantado no passado e nos dias atuais.

3. Discussão e resultados

3.1 Critérios de escolha das tecnologias de corte

Cada jazida de rocha ornamental possui características geológicas próprias, que estão relacionadas aos tipos petrográficos e fatores estruturais presentes. Tal peculiaridade acarreta no emprego de diferentes métodos e técnicas de lavra, bem como a escolha de diferentes tecnologias de corte.

O desenvolvimento tecnológico recente proporcionou a existência de diversas soluções capazes de satisfazer as exigências técnicas para a produção de blocos. Contudo, a vasta gama de opções, pode facilmente levar a uma escolha errada da metodologia de corte utilizada, exigindo um estudo amplo das variáveis envolvidas na operação da mina.

A literatura traz os aspectos mais importantes a serem observados para o emprego da tecnologia de corte adequada, visando obter o melhor aproveitamento da jazida. São eles, os parâmetros técnicos, econômicos, de segurança e de saúde ocupacional dentre as tecnologias existentes. Tais parâmetros devem ser confrontados e os melhores resultados devem ser considerados.

3.1.1 Parâmetros técnicos e econômicos

Com a crescente evolução dos equipamentos e o advento do fio diamantado, algumas técnicas têm caído em desuso. Anteriormente, cada grupo de rocha tinha uma técnica de corte mais utilizada devido as características da rocha. Em mármore, por exemplo, utilizava-se o fio helicoidal e em granitos utilizava-se largamente o *flame-jet*. Com a evolução do fio diamantado, esta tecnologia tornou possível suprir satisfatoriamente o desempenho desses equipamentos, não havendo limitação para ambos os tipos de rochas. Tal substituição foi possível devido a evolução da tecnologia de corte com fio diamantado, conforme pode ser observado na figura 90.

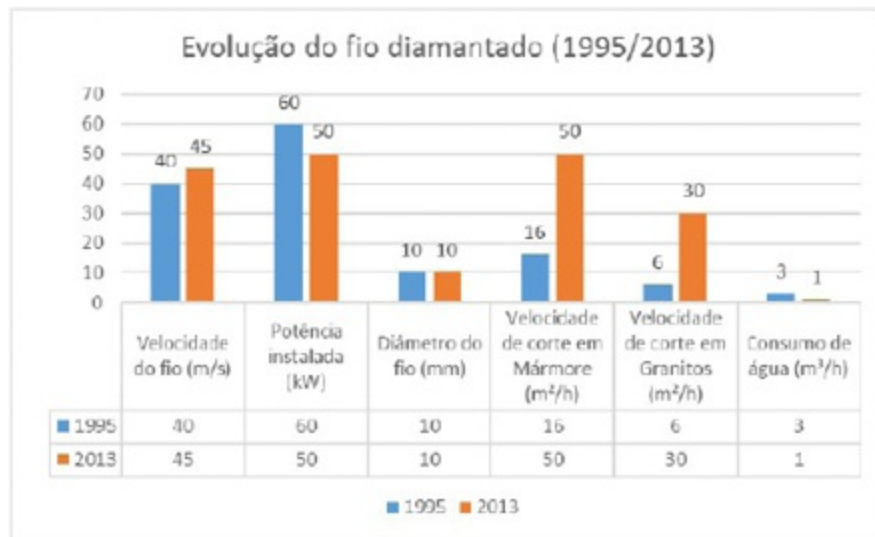


Figura 90. Evolução dos parâmetros do fio diamantado (1995-2013)

Fonte: Adaptado de Alencar et al., 1996 e Vidal et al., 2013.

Na figura 90, admitiu-se o limite superior de operação da tecnologia do fio diamantado. Isto é, diante das variações existentes, considerou-se o maior valor obtido. É possível observar no gráfico a evolução do fio diamantado no intervalo compreendido entre 1995 e 2013. A tecnologia evoluiu em eficiência energética, consumo de água e velocidade de corte, como pode ser observada na figura 90. O fio diamantado passou a ter maior produção horária, enquanto a potência requerida dos equipamentos diminuiu. Além disso, o consumo de água requerido no processo diminuiu em 66%, acompanhando as tendências ambientais de menor consumo.

Dos referidos parâmetros, o que mais tem contribuído para a utilização do fio diamantado como tecnologia de corte predominante na lavra de rochas ornamentais, é sem dúvidas a velocidade de corte, que sobretudo no corte de rochas silicatadas teve um expressivo avanço. O incremento na produção horária dos granitos foi na ordem de 80%. Já nos mármore, por se tratar de uma rocha com menor dureza, o fio diamantado já atingia valores elevados em relação as demais técnicas de corte, no ano de 1995. A evolução na velocidade de corte em mármore no período estudado foi de 68%.

A Tabela 38 traz valores de velocidade de corte e produtividade para alguns granitos brasileiros.

Ano 2000		
Material	Velocidade de corte (m²/h)	Produtividade (m²/m)
Bordeaux (RN)	1,8	15
Branco Ceará (CE)	2,6 – 3,5	10 - 14
Branco Piracema (MG)	1,8	14
Branco Romano (ES)	2,5	20
Casa Blanca (CE)	1,2	16
Giallo California (MG)	1,3	16
Ouro Branco (CE)	2,9	25
Ouro Brasil (ES)	2,4	18
Preto São Gabriel (ES)	4,5	45
Samoa Light (ES)	2,0	16
Verde Labrador (ES)	2,6	22
Verde Pavão (ES)	2,4	24
Anos 2011 – 2013		
Preto São Domingos (ES)	8 – 10	24 – 30
Preto São Gabriel (ES)	30	24 – 30
Verde Pavão (ES)	5 – 6	16 – 18
Cinza Corumbá (ES)	10 – 15	16 – 18
Amarelo Ornamental (ES)	15 – 20	26 – 32
Bege Pavão (ES)	12	24 – 28
Verde Pavão (ES)	12	24 – 28

Tabela 38. Produtividade e rendimento de fio diamantado no Brasil em lavra de granito

Fonte: Vidal et al., 2013.

É possível observar pela análise da tabela 38 a variação positiva da velocidade de corte dos anos 2000 para 2011-2013. Além disso, observa-se

na tabela uma variação positiva da produtividade do fio, isto é, o rendimento do fio aumentou com o avanço da tecnologia. É importante ressaltar que a variação de velocidade de corte em granitos é bastante variável, de acordo com a dureza do material. Portanto, é possível que rochas silicáticas (granitos), de acordo com seu arranjo cristalino, tenham diferentes durezas.

Conclusões

O conteúdo abordado no presente capítulo, permite compreender a evolução da tecnologia de corte com o fio diamantado. Por meio dos resultados obtidos, é possível observar que o custo de operação do fio diamantado se tornou relativamente baixo, com altas taxas de produção, sendo flexível quanto à natureza petrográficas da rocha, com baixa geração de resíduos e nível de ruído. Tais vantagens operacionais têm permitido que o fio diamantado seja utilizado nas diferentes fases da lavra de rochas ornamentais – corte primário, secundário, esquadreamento – e em diferentes tipos de rochas.

O fio diamantado se destaca como uma tecnologia de baixa geração de resíduos. Isto é possível graças à algumas características técnicas da tecnologia empregada. Entre as características se destacam: a espessura de corte, que em média tem apenas 10 mm, sendo considerado insignificante quando comparado a outras tecnologias; regularidade de corte nas superfícies, além do mecanismo de corte, que não ocasiona danos estruturais nos blocos, mantendo-o íntegro.

Com o crescimento do mercado internacional de rochas ornamentais, tornou-se necessário a elevação do nível tecnológico da cadeia produtiva, afim de atender a demanda e de oferecer um produto em conformidade com as normas internacionais de qualidade. Além disso, normas ambientais foram estabelecidas nas últimas décadas, buscando a diminuição do impacto ambiental decorrente da geração de resíduos.

Diante dessas demandas, o fio diamantado apresenta-se como uma tecnologia de corte eficiente. Graças a sua evolução rápida e constante, tornou-se a principal tecnologia de corte utilizada na lavra de rochas ornamentais, de modo a atender os critérios de qualidade e produtividade.

Referências

- ALENCAR, Carlos Rubens A.; CARANASSIOS, Adriano; CARVALHO, Denilson. **Tecnologias de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais**, v. 3. Fortaleza: IEL/FIEC, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor de rochas ornamentais e de revestimento situação atual, demandas e perspectivas frente ao novo marco regulatório da mineração brasileira**. São Paulo: 2013.
- CHIODI FILHO, Cid. **Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais**. Rio de Janeiro: CNPq/CETEM, 1995. (Série Estudos e Documentos).
- COSTA, Bruno Muniz. **Avaliação qualitativa das metodologias de lavra utilizadas na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua – RJ**. 2009. 59 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MENEZES, Ricardo Gallart de. **Tecnologias de lavra em maciços rochosos**. 2005. 48 f. Monografia (Especialização em Rochas ornamentais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MONTEIRO, Carlos F. Fernandes. **Corte de pedra por fio diamantado**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga .
- REGADAS, Isaura Clotilde M. da Costa. **Aspectos relacionais às lavras de granitos ornamentais com fio diamantado no norte do estado do Espírito Santo**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- REIS, Renato Capucho; SOUSA, Wilson Trigueiro. Método de lavra de rochas ornamentais. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, p. 207-209, jul./set. 2003.

VIDAL, Francisco W. Holanda; et al. Lavra de Rochas ornamentais. In: _____. **Tecnologia de rochas ornamentais:** pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013, p. 153-258.

Notas

- 63.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: rita.pedrosa@ufg.br.
- 64.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: nobre.yuri@gmail.com.
- 65.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: victor.ataide@outlook.com.br.
- 66.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: ctunussi@gmail.com.

Análise numérica da condutividade hidráulica a partir de modelos empíricos

*José Carlos Campos Gonçalves Filho*⁶⁷

*Luciana Vale Silva*⁶⁸

*Marcos Napoleão Rabelo*⁶⁹

*Luiz Fernando Elias Martinez*⁷⁰

*Bruno Rodrigues de Oliveira*⁷¹

Resumo: Neste trabalho foi realizada uma análise numérica da curva de potencial hidráulico, $\theta(h)$, em função de dados coletados, através de amostras de solos, na regional Catalão. Fez-se a validação dos modelos empíricos comparando dados experimentais de coeficientes hidráulicos com os dados preditos pelos modelos. Foi realizada também uma análise empírica, através de modelos teóricos encontrados na literatura nos últimos anos. Tais modelos relacionam o coeficiente hidráulico do solo com outros parâmetros como, granulometria, índice de vazios entre outros. Esta linha de pesquisa tem crescido devido a sua fácil implementação quando comparado a testes puramente experimentais. A análise numérico-computacional, juntamente com modelos teóricos auxiliam no design de experimentos, diminuindo a probabilidade de erro e consequentemente os custos operacionais. As formas analíticas, quando validadas por ensaios experimentais, permite um espectro considerável de análises envolvendo dinâmica de solos como, difusividade hidráulica, redes de fluxos entre outros.

Palavras-chave: Coeficiente hidráulico. Solos. Modelagem.

Introdução

O uso de modelos empíricos como ferramenta de simulação da condutividade hidráulica de solos não saturados é um tema que tem atraído a atenção de vários pesquisadores, Brookes e Corey (1966), Brookes e Corey (1964), Van Genuchten (1980), Reeves e Duiguid (1975); Segol (1976) bem como Vauclin et al. (1979). A literatura mostra que muito esforço tem sido empregado na tentativa de validar modelos empíricos como forma de contrapor a tomada de decisões apenas por bases experimentais. Entretanto, conforme pontua Van Genuchten (1980), existe uma grande dificuldade em caracterizar o comportamento hidráulico de solos por meio de simulações computacionais a partir de modelos empíricos. Acredita-se que esta dificuldade reside no fato que o comportamento dinâmico dos solos apresenta uma quantidade considerável de parâmetros, que do ponto de vista da modelagem teórica, fica difícil mensurar. Isto faz com que os resultados, baseados em modelos empíricos, sejam muitas vezes conservadores nos resultados numéricos quando comparados aos valores experimentais. Isto faz com que estimativas confiáveis, do real comportamento da condutividade hidráulica sejam difíceis de serem obtidas, mesmo do ponto de vista experimental. Outro ponto importante na análise da dinâmica do solo é sua forte característica anisotrópica. Assim, prever o comportamento dinâmico dos solos, com uma confortável margem de confiabilidade é uma tarefa extremamente difícil de atingir. Os modelos empíricos, através do estudo de formas analíticas que descrevem o comportamento dinâmico do coeficiente hidráulico para solos não saturados, vem neste sentido, tentar contribuir na análise de tais ambientes visando a tomada de decisões de forma mais segura possível

A literatura sobre modelos empíricos que descrevem o comportamento hidráulico de solos não saturados é relativamente extensa. Entre os primeiros modelos podemos citar os trabalhos de Millington e Quirk (1961), onde os autores apresentaram um método para a análise empírica de solos não

saturados, conhecido como método de Millington-Quirk. Levando em consideração a variação contínua das dimensões dos poros, a seguinte expressão é obtida

$$K = \frac{2}{\varepsilon^2} \int_0^R \int_0^r \eta'(s) \varepsilon^2 \eta'(e) de ds \quad (1)$$

(1) em que K representa a permeabilidade do solo; $\varepsilon(r)$ representa o volume de poros por unidade de volume com raio $< r$; $\varepsilon(R)$ representa a porosidade, onde R é o máximo da média dos raios e $\eta(r) = (\varepsilon - \varepsilon(R))/r$ representa área dos poros por unidade de área de seção transversal. A partir da equação (1) vários autores apresentaram contribuições aos modelos de análise empírica (Jackson; Reginato; Van Bavel, 1965) e (Mualem, 1976a).

Outros autores apresentaram expressões analíticas alternativas para prever o comportamento hidráulico de solos não saturados (Brooks; Corey, 1964) e (Jepson, 1974). Neste caso expressões analíticas para o comportamento de solos não saturados foram obtidos através da teoria de Burdine (Burdine, 1953). A literatura reporta bons exemplos de precisão nas estimativas mesmo assumindo como premissa a descontinuidade dos poros (Brooks; Corey, 1964) e (Brooks; Corey, 1966).

Do ponto de vista numérico os modelos empíricos podem influenciar na convergência de métodos de análise. Levando em consideração descontinuidades nos modelos, cuja variação dos volumes dos poros, pode influenciar na taxa de convergência para problemas envolvendo fluxo hidráulico de solos saturados e não saturados.

Em Mualem (1976a) uma nova formulação empírica, para prever o comportamento hidráulico do solo, foi introduzida levando em consideração a curva de retenção solo-água juntamente com a condutividade de saturação. Usando fórmulas de integração apropriada chegou-se às expressões analíticas da condutividade hidráulica.

Usando a técnica desenvolvida em Mualem, (1976a), Van Genuchten desenvolveu modelos empíricos de previsão de solos não saturados a partir do conhecimento da curva de retenção do solo.

Outras formas bastante empregadas no estudo do comportamento dos solos não saturados é a análise granulométrica. Os estudos realizados mostram que as distribuições dos poros são úteis na determinação das características hidráulicas de solos. Entretanto, é difícil caracterizar a distribuição dos vazios no solo (Salarashayeri; Siosemarde, 2012). Desta forma, a distribuição granulométrica é o parâmetro mais utilizado para a determinação da condutividade hidráulica, particularmente em situações em que há pouca disponibilidade de tempo e/ou amostras para as análises diretas.

Neste trabalho foi realizada a análise numérica do comportamento da condutividade hidráulica de solos a partir dos modelos propostos por Van Genuchten (1980).

O artigo encontra-se dividido da seguinte forma: na seção 1 é apresentado o comportamento da condutividade hidráulica a partir de valores de carga de pressão total. Na seção 2 foram usadas fórmulas empíricas que descrevem o comportamento da granulometria do solo a partir de parâmetros como: densidade do solo e da água; variação da velocidade de escoamento da água no solo. A partir das informações obtidas no passo anterior, serão utilizados os modelos, fornecidos pela literatura, para descrever o comportamento hidráulico do solo e na seção 3 são feitas as considerações finais do trabalho.

1. Desenvolvimento teórico

1.1 Equações no modelo de Mualem

Nesta seção considera-se o coeficiente hidráulico como função da carga hidráulica total. A equação a seguir descreve este comportamento (Mualem, 1976a).

$$K_r = \Theta^{1/2} \left[\int_0^{\Theta} \frac{1}{h(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2 \quad (2)$$

onde K_r representa o coeficiente hidráulico do solo e h a carga hidráulica total. Na equação (2) o parâmetro Θ representa uma variação adimensional, que pode ser interpretada como uma função da umidade, dada da seguinte forma,

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

Na equação (3) o parâmetro θ_r representa a umidade do solo e os parâmetros θ e θ_s representam respectivamente o índice de saturação de humidade e os valores residuais de humidade. Na equação (2) tem-se a relação de dependência entre as variáveis Θ e h .

Um dos grandes desafios na teoria de modelos empíricos é determinar qual a melhor relação entre Θ e h de forma que o ajuste entre a simulação numérica e os dados experimentais tenha o menor erro possível. Em Van Genuchten (1980), a seguinte classe de funções é considerada:

Um dos grandes desafios na teoria de modelos empíricos é determinar qual a melhor relação entre Θ e h de forma que o ajuste entre a simulação numérica e os dados experimentais tenha o menor erro possível. Em Van Genuchten (1980), a seguinte classe de funções é considerada:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (4)$$

A equação (2) demonstra a relação entre umidade e carga hidráulica total, via parâmetro Θ . Porém é possível escrever esta relação de forma invertida, ou seja, expressar a carga hidráulica como função da umidade. De acordo com Van Genuchten (1980), utilizando esta relação invertida e substituindo na equação (2), a relação para o coeficiente hidráulico assume a seguinte forma

$$K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} \left[\frac{f(\Theta)}{f(1)} \right]^2 \quad (5)$$

onde a função $f(\Theta)$ é dada por

onde a função $f(\Theta)$ é dada por

$$f(\Theta) = \int_0^{\Theta} \left[\frac{x^{1/m}}{1-x^{1/m}} \right] dx \quad (6)$$

É importante observar que tanto a equação (5) quanto a equação (6) são obtidas supondo certas restrições nos coeficientes m e n (Van Genuchten, 1980). A equação (6) pode ainda ser substituída, por uma relação envolvendo a função Beta, assumindo assim a seguinte forma

$$f(\Theta) = m \int_0^{\Theta} y^{m-1+1/n} (1-y)^{-1/n} dy \quad (7)$$

A equação (7) é considerada, assumido que $m=1-1/n$ e $0 < m < 1$. Pode ainda, estabelecer uma relação entre o coeficiente hidráulico e a carga total hidráulica que de acordo com Van Genuchten (1980) é dada pela equação abaixo:

$$K_r(h) = \frac{(1 - (\alpha h)^n)^{-1} (1 + (\alpha h)^n)^{-m}}{(1 + (\alpha h)^n)^{m/2}} \quad (8)$$

Na equação (8) é importante ressaltar, ainda, a relação entre os coeficientes m e n , $m=1-1/n$. Usando a função $f(\Theta)$ é possível mostrar que o coeficiente hidráulico pode ser expresso através do parâmetro adimensional Θ , o que por sua vez, de acordo com a equação (3) permite concluir que o coeficiente hidráulico pode ser expresso como função da umidade de acordo com a equação abaixo (Van Genuchten, 1980),

$$K_r = \Theta^2 (1 - (1 - \Theta^{1/m})^m) \quad (9)$$

1.2 Modelo de Burdine

Similar à equação (2), Burdine (1953), propôs um modelo de equação, relacionando condutividade hidráulica e carga hidráulica total, dada pela seguinte equação

$$K_r(\Theta) = \Theta^2 \left[\int_0^\Theta \frac{1}{h^2(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h^2(x)} dx \right]^2 \quad (10)$$

Uma análise similar, feita para o modelo de Mualem, também pode ser feita para o presente caso. Isto significa que pode-se estabelecer relações entre o parâmetro adimensional Θ e a condutividade hidráulica, consequentemente relações envolvendo umidade e condutividade hidráulica de acordo com a equação (3).

2. Resultados numéricos

Nesta seção é apresentada uma análise numérica do comportamento do coeficiente hidráulico de acordo com os vários tipos de parâmetros estudados na seção anterior. Inicia-se com a equação (3) que estabelece, via uma equação integral, a relação entre condutividade hidráulica, umidade e carga hidráulica totais.

A análise tem início pela equação (3). Pelo gráfico, vários perfis de condutividade hidráulica para diferentes valores de umidades de saturação e saturação residual, respectivamente; apresenta a variação da condutividade hidráulica como função da carga hidráulica total, h . Percebe-se que o perfil do coeficiente hidráulico apresenta comportamento similar aos da literatura, solos com características não saturados (Van Genuchten, 1980). Como pode ser visto pela figura 91, o comportamento do coeficiente hidráulico, para umidade de saturação 0.10 e umidade residual 0.05 apresenta o menor perfil. A medida que os parâmetros de umidade vão aumentando o perfil de condutividade também aumenta. Os casos onde a umidade de saturação e

residual atingem respectivamente, 0.50, 0.50 e 0.80 e 0.80 representam o maior índice de umidade.

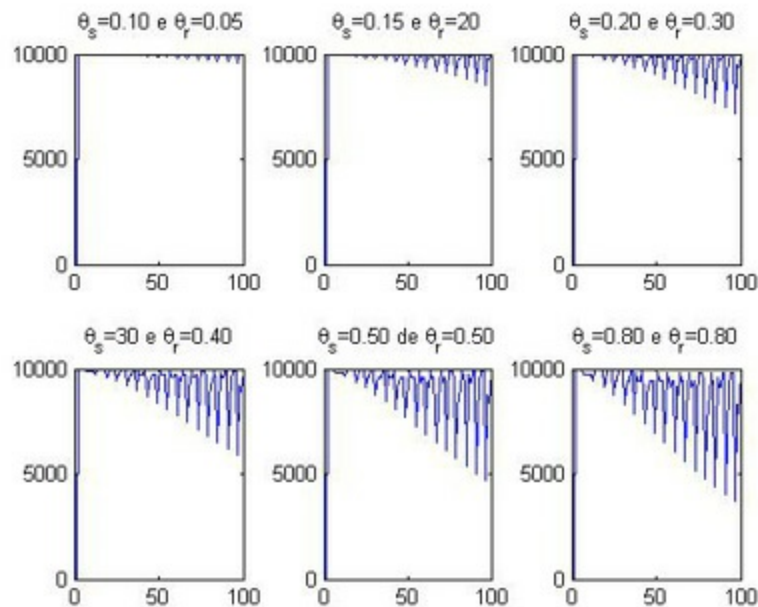


Figura 91. Comportamento hidráulico para vários parâmetros de umidade

Fonte: Próprio autor.

No próximo conjunto de gráficos tem-se o comportamento da umidade como função do parâmetro adimensional Θ de acordo com a equação (3). Este conjunto de gráficos representa o comportamento da umidade para diferentes valores de umidade de saturação e saturação residual. A relação usada como parâmetro para obter o comportamento da umidade baseou-se nas equações (3) e (4). A partir da equação (3), foi estabelecido uma relação de iteração com respeito à variável carga hidráulica total, h . Este processo iterativo foi construído a partir da equação (1), que estabelece uma relação entre parâmetro adimensional Θ , carga hidráulica total h e a condutividade hidráulica K_r . De acordo com a figura 92, para o caso em que os coeficientes de umidade de saturação e umidade residual são, respectivamente 0.10 e 0.05. Percebe-se que o perfil de umidade começa em torno de 0.1 e a carga

hidráulica total vai aumentando. É preciso lembrar que para este caso, a umidade é função do parâmetro adimensional Θ juntamente com a carga hidráulica total h , de acordo com as equações (2), (3) e (4). Já para os parâmetros de saturação e umidade residual para os valores 0.15 e 0.20 tem-se uma inversão, ou seja, a medida que a carga hidráulica aumenta os valores de umidade também aumenta. Esta característica também vale para os outros parâmetros de saturação. Isto indica que a pontos de bifurcação próximo destes parâmetros. Também, para os valores de saturação e resíduo próximo de 0.50 e 0.80 respectivamente vemos a presença de bifurcações.

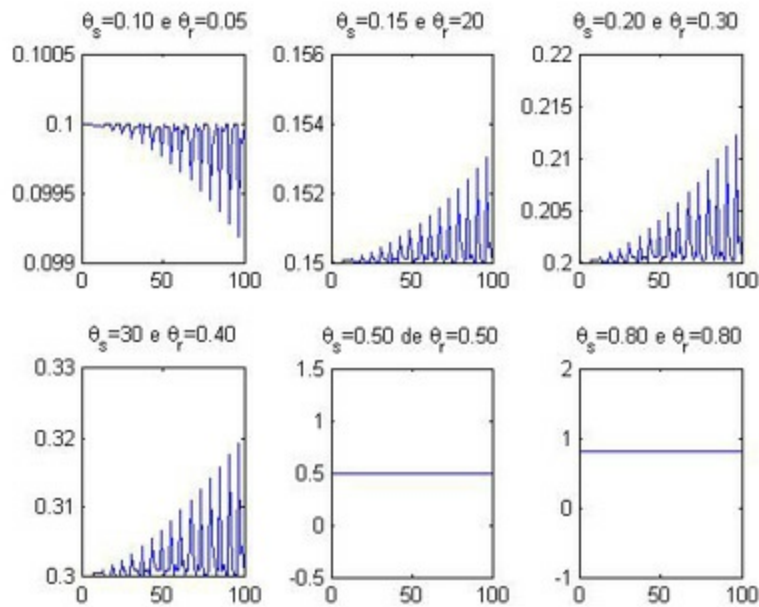


Figura 92. Comportamento da Umidade para Valores de Umidade de Saturação e Residual

Fonte: Próprio autor.

Para a relação entre o parâmetro adimensional Θ e o coeficiente hidráulico $K_r(\Theta)$, utilizando a equação (9) podemos determinar o comportamento deste parâmetro conforme os gráficos abaixo,

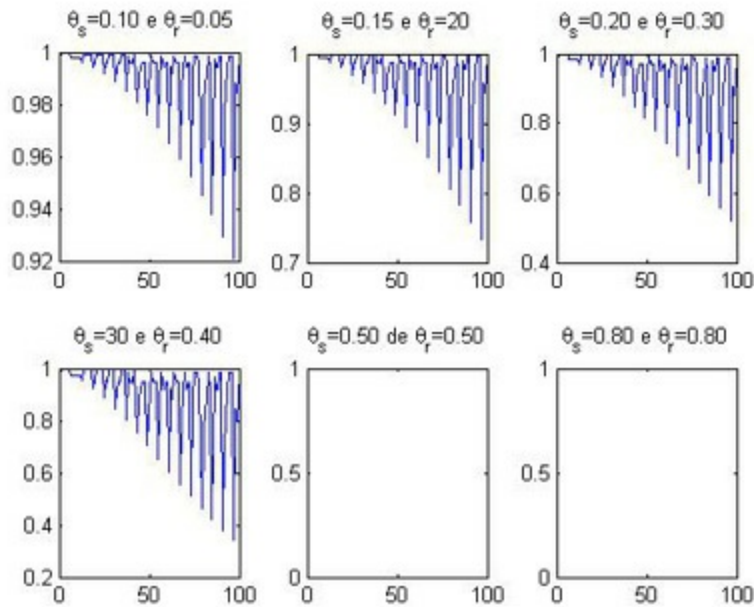


Figura 93. Comportamento do coeficiente hidráulico em função do parâmetro adimensional Θ

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que na figura 93, o perfil do coeficiente hidráulico, levando em consideração o parâmetro adimensional Θ , juntamente com os parâmetros de umidade de saturação e residual, possui um perfil similar aos gráficos apresentados na figura 91. Para $\theta_s=0.1$ e $\theta_r=0.05$ resulta em uma maior concentração do coeficiente hidráulico à medida que a umidade aumenta. À medida que os parâmetros de umidade de saturação e umidade residual aumentam o coeficiente hidráulico começa a mudar seu perfil atingindo um ponto de bifurcação para os parâmetros $\theta_s=0.5$ e $\theta_r=0.5$.

Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise numérica sobre os principais modelos empíricos utilizados para estudar o comportamento do coeficiente hidráulico de solos não saturados. A importância destas estimativas reside no fato que este parâmetro é utilizado no modelo de permeabilidade de solos.

Trata-se de um modelo envolvendo equações diferenciais parciais. Através deste modelo é possível construir as redes de fluxos hidráulicos em solos. Estas redes são importantes, pois ajudam na análise mecânica dos solos como distribuições de tensões entre outros. O procedimento para obtenção da condutividade hidráulica de solos geralmente é feito por procedimentos experimentais. Entretanto, a literatura mostra que, existem pesquisas voltadas na construção de modelos empíricos que sejam capazes, através de validação experimental, descrever o comportamento hidráulico dos solos sem a necessidade de recorrer rotineiramente aos procedimentos experimentais. Neste caso a nova metodologia se torna extremamente eficiente do ponto de vista quantitativo.

Referências

- AHUJA, L. R.; SWARTZENDRUBER, D. An improved form of soil-water diffusivity function. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 36, p. 9-14, 1972.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T., Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n. 3, Civil Engineering Dep., Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., 1964.
- _____. Properties of porous media affecting fluid flow. **J. Irrig. Drain. Div.** American Society Civil Engineering, v. 92, p. 61-88, 1966.
- BRUCE, R. R., Hydraulic conductivity evaluation of the soil profile from soil water retention relations, **Soil. Sci. Soc. Am.**, v. 36, p. 555-561, 1972.
- BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data, **Petr. Trans. Amer. Inst. Mining Metall. Eng.**, v. 198, p. 71-77, 1953.
- ELRICK, D. E., BOWMAN, D. H., Note on an improved apparatus for soil moisture flow measurements, **Soil Sci. Am.**, v. 28, p. 450-453, 1964.
- ENDELMAN, Fred J.; et al. The mathematical modeling of soil-water-nitrogen phenomena. **Oak Ridge National Laboratory**, 1974.
- CHAKRABORTY, Debashis; et al. Prediction of hydraulic conductivity of soils from particle-size distribution. **Current Science**, v. 90, n. 11, p. 1526-1531, 2006.

- DAS, B. M. Geotechnical Properties of Soils. In: _____. **Principles of Foundation Engineering**. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2010. p. 1-63.
- _____. Hydraulic Conductivity and Seepage. In: _____. **Fundamentals of Geotechnical Engineering**. 3. ed. Estados Unidos: Cengage Learning, 2007, p. 111-146.
- DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, v. 103, p. 113-118, 2009.
- GHANBARIAN, Behzad; et al. Upscaling soil saturated hydraulic conductivity from pore throat characteristics. **Advances in Water Resources**, v. 104, p. 105-113, 2017.
- GREEN, R. E.; COREY, J. C., Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods, **Soil Sci. Am. Proc.**, v. 35, p. 3-8. 1971.
- HAVERKAMP, R.; et al. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 41, p. 285-294, 1977.
- JACKSON, R. D. On the calculation of hydraulic conductivity, **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 36, p. 380-382, 1972.
- JACKSON R. D.; REGINATO, R. J.; VAN BAVEL, C. H. M., Comparison of measured and calculated hydraulic conductivities of unsaturated soils. **Water Resour. Res.**, v. 1, p. 357-380. 1965.
- HAZEN, Allen. Some physical properties of sands and gravels. **Massachusetts State Board of Health, Annual Report**, p. 539-556, 1892.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia.
- JADCZYSZYN, J.; NIEDZWIECKI, J. Relation of Saturated Hydraulic Conductivity to Soil Losses. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 14, n. 4, p. 431-435, 2005.
- JEPSON, R. W. Axisymmetric infiltration in soils, I. Numerical techniques for solution. **J. of Hydrol**, v. 23, p. 111-130, 1974.
- MACDONALD, Alan M.; et al. Relating in situ hydraulic conductivity, particle size and relative density of superficial deposits in a heterogeneous catchment. **Journal of Hydrology**, v. 434-435, p. 130-141, 2012.
- MILLINGTON, R. J.; QUIRK, J. P. Permeability of porous solids, **Trans. Faraday Soc.**, v. 57, p. 1200-1206, 1961.
- MUALEM, Yechezkel. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resour**, v. 12, p. 513-

523, 1976a.

- REEVES, M.; DUGUID, J. O. Water movement through saturated–under saturated porous media: A finited–element Galerkin model, ORNL-4927. **Oak Ridge National Laboratory**, Oak Ridge, Tenn, 1979.
- REYNOLDS, W. D. Use of bimodal hydraulic property relationships to characterize soil physical quality. **Geoderma**, v. 294, p. 38-49, 2017.
- SALARASHAYERI, A. F.; SIOSEMARDE, M. Prediction of Soil Hydraulic Conductivity from Particle-Size Distribution. **International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 16-20, 2012.
- SEGOL, G. **Three-dimensional Galerkin finite element model for the analisys of contaminant transport in variably saturated porous media**. User guide. Canada: UW, 1976.
- U.S. DEPARTAMENT OF NAVY, **Design Manual – Soil Mechanics, and Earth Structures** - NAVFAC DM-7, U.S Governament Printing Office, Washington, DC, 1971.
- VAN GENUCHTEN, Martinus. Th., A closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-890, 1980.
- VAUCLIN, M.; HAVERKAMP, R.; VACHAUD, G. **Résolution numérique d’une equation de diffusion non linéaire**. Presses Universitaires de Grenoble, France, 1979. 183 pp.
- VIENTKEN, Thomas; DIETRICH, Peter. Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data. **Journal of Hydrology**, v. 400, p. 58-71, 2011.

Notas

- 67.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: josecarlostutoretec@gmail.com.
- 68.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: lucianavales@gmail.com.
- 69.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: rabelo@dmate.ufpe.br.
- 70.** Centro de Ensino Superior de Catalão – CESUC. Coordenador de Sistemas de Informação. Departamento de Tecnologia da Informação. Contato: luizfernandoelias@gmail.com.

71. Instituto Federal do Triângulo Mineiro – IFTM. Campus Paracatu. Contato: brunorodrigues@iftm.edu.br.

Efeitos da atualização da NBR 6118 nos projetos de pontes ferroviárias – estudo de caso

Ana Nívia de Souza Pantoja⁷²

João Pedro Sena⁷³

Pedro Henrique Pedrosa de Melo⁷⁴

Wellington Andrade da Silva⁷⁵

Resumo: Neste artigo são apresentados os resultados da análise estática do Viaduto II Trecho Araguari-Pires do Rio, da Ferrovia Centro Atlântica. A obra de arte de concreto armado foi dimensionada com base na NB 1:1960 e executada em 1970 pelo 2º Batalhão Ferroviário. Dada as atualizações ocorridas nos procedimentos de cálculo de pilares e nas considerações acerca das propriedades dos materiais, tornou-se importante o estudo para avaliação da capacidade resistente das seções transversais destes elementos frente aos esforços solicitantes. Para tanto, fez-se a modelagem estrutural com a utilização do método dos Elementos Finitos a fim de determinar a solicitação na estrutura e assim verificar a adequação aos critérios de segurança da norma atualizada.

Palavras-chave: Viaduto ferroviário. Atualização norma. Verificação. Segurança.

Introdução

Os pilares são elementos lineares de eixo reto, dispostos verticalmente, com forças normais de compressão preponderantes. No dimensionamento de tais elementos, a atualização da NBR 6118 introduziu importantes alterações a fim de imprimir maior segurança e aumentar a durabilidades das estruturas,

principalmente no que tange à avaliação das excentricidades, a metodologia de cálculo para esbeltez limite e a verificação do momento fletor mínimo.

Além destes aspectos, Cerutti (2015) ressalta que o avanço nas tecnologias e no conhecimento das propriedades do concreto, obtidos desde a última atualização da norma em 2007, contribuiu para a definição mais próxima do comportamento real de suas características, como por exemplo, o módulo de elasticidade. Outro fator que se atualizou foi o aumento da classe C50 até a classe C90. Os ábacos e tabelas referentes à deformação específica, diagrama de tensões e domínios de deformação no ELU foram atualizados na atualização da norma, informações estas imprescindíveis no dimensionamento de uma estrutura com elementos de elevada esbeltez.

Segundo Marques (2006), as normas europeias referentes ao dimensionamento de estruturas já vêm buscando a inclusão de aspectos anteriormente ignorados, como cálculos dinâmicos acima de certas velocidades, conforto dos, estabilidade da via, entre outros. Considerando a nossa realidade atual, percebe-se a necessidade de verificação das melhorias propostas desde a última atualização da norma NBR 6118 e também do levantamento de sugestões que busquem melhorar os resultados finais obtidos no dimensionamento.

A ponte ferroviária da Ferrovia Centro Atlântica (FCA), localizada entre as cidades de Catalão (GO) e Araguari (MG) data da década de 1970, portando utiliza as normas supracitadas não atualizadas, e dessa maneira, o presente trabalho tem por finalidade analisar de maneira clara e objetiva as mudanças apresentadas na NBR 6118 que afetam diretamente a segurança do usuário, relacionando as resistências das seções transversais dos pilares existentes na estrutura em questão com os limites postos pela renovação da norma.

Revisão bibliográfica

Datado de 1970, a malha ferroviária entre a cidade de Goiandira/GO e Araguari/MG foi projetada pelo 2º Batalhão Ferroviário e inaugurada em 1978 pelo Presidente Ernesto Geisel. O trecho é bastante utilizado para o transporte de minério de ferro, especialmente o nióbio, bastante extraído na região, o qual possui densidade de $8,570 \text{ g/cm}^3$. Assim, este trecho configura o objeto de estudo do presente trabalho, em especial o Viaduto II: Trecho Araguari – Pires do Rio, localizado na coordenada geográfica $18^\circ 30' 33,86'' \text{ S}$ e $48^\circ 09' 04,68'' \text{ O}$, no estado de Minas Gerais.

O estudo dos aspectos necessários para o dimensionamento de pontes e viadutos, como solicitações e excentricidades, se faz necessário para a obtenção de resultados coerentes e dentro das especificações mínimas de segurança, principalmente no presente trabalho onde estes valores mínimos são comparados entre normas utilizadas em construção já existente e normas atuais. Além disto, a definição dos componentes estruturais e a caracterização estrutural, considerando os valores geométricos, são etapas que precedem o dimensionamento e refletem na qualidade dos resultados.

1.1 Solicitações das pontes e viadutos

Segundo a NBR 8681:2004 (ABNT, 2004) as deformações impostas são chamadas de ações indiretas e as forças, de ações diretas. A NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) afirma que para análise da estrutura devem ser consideradas a influência de todas as ações que produzam efeitos com relação à segurança da estrutura. Assim, tem-se as ações permanentes, variáveis e excepcionais. São destacadas as ações pertinentes para o estudo, sendo elas: peso próprio dos elementos, retração do concreto, cargas móveis, efeito dinâmico das cargas móveis, choque lateral, frenagem ou aceleração, pressão do vento e variação da temperatura.

De acordo com a NBR 7187:2003 (ABNT, 2003), para cargas permanentes distribuídas, é preciso conhecer o volume, o comprimento e o

peso específico do material. O peso específico considerado para o lastro ferroviário é de 18 kN/m³, para os dormentes, trilhos e acessórios é de 8 kN/m, e para o concreto de 25 kN/m³.

A deformação específica de retração do concreto pode ser calculada simplificada pela Tabela 8.2 da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) por interpolação linear, quando não é exigida grande precisão. As cargas móveis geradas pelos veículos que utilizam a estrutura são determinadas pela NBR 7189:1985 para ferroviárias ou ainda pelo proprietário da obra.

De acordo com Pfeil (1983), o impacto vertical é dado pelo acréscimo das cargas dos veículos provocado pelo movimento destes sobre a ponte ou viaduto, o qual é descrito por fórmulas empíricas devido ao tipo de tráfego no viaduto, da seguinte forma, com l representando o vão do tramo calculado e este sendo inserido em metros:

$$\varphi = 0,1\%(1600 - 60\sqrt{l + 2,25l}) \geq 1,2 \quad (1)$$

Para Marchetti (2008), em pontes ferroviárias, o impacto lateral é provocado pela folga entre as rodas do trem e as faces internas dos boletos dos trilhos. Equiparadas a forças horizontais normais no eixo da linha, atuam como uma carga concentrada no topo do trilho, com 20% da intensidade da carga do eixo mais pesado.

Segundo Marchetti (2008), o movimento dos veículos sobre pontes e viadutos gera uma força dinâmica, a qual pode ser dividida em frenagem e aceleração. De acordo com a NBR 7187:2003 (ABNT, 2003) tem-se que a aceleração é 25% do peso dos eixos motores e a frenagem 15% da carga móvel sobre o tabuleiro.

De acordo com Pfeil (1983), a pressão do vento depende principalmente da forma da superfície e da sua posição com relação ao vento. Assim, a carga de vento sobre o viaduto descarregado é 1,5 kN/m² e 1,0 kN/m² para o viaduto carregado.

Segundo a NBR 6118:2014, as variações de temperatura dependem do local de implantação da construção e das dimensões da estrutura. Assim, de maneira genérica tem-se uma variação de 10 °C a 15 °C para elementos com menor dimensão ≤ 50 cm e variação de 5 °C a 10 °C para elementos com menor dimensão ≤ 70 cm. Os critérios de segurança das estruturas baseiam-se na NBR 8681:2004 (ABNT, 2004). A estrutura ou parte dela atinge o estado limite quando de forma efetiva ou convencional torna-se inutilizável ou deixa de satisfazer as condições previstas de utilização.

A combinação de ações objetiva analisar a estrutura no caso mais desfavorável das solicitações, considerando as cargas que tem probabilidade de ocorrerem simultaneamente. As combinações últimas são discriminadas em normal, especial e excepcional. Nessas combinações são ponderadas as ações permanentes e ações variáveis com seus respectivos coeficientes. As combinações de serviço são caracterizadas de acordo com o tempo de ação sobre a estrutura como: quase permanente, frequente e rara. Tais combinações são realizadas para verificação dos estados limites de deformações excessivas, de formação de fissuras, de abertura de fissuras e de vibração excessiva.

1.2 Dimensionamento da mesoestrutura

O dimensionamento de estruturas consiste basicamente em três etapas: a determinação de seções satisfatórios para os elementos, tendo em vista os esforços; a especificação da área e distribuição das armaduras longitudinais e transversais, além das armaduras adicionais devido a cargas concentradas; e o detalhamento da armação.

1.2.1 Índice de Esbeltez

De acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), entende-se por índice de esbeltez a razão entre o comprimento de flambagem e o raio de giração.

Sussekkind (1947) afirma que os pilares podem ser divididos de acordo com a esbeltez e o tipo de análise dos efeitos de 2º ordem, conforme a TABELA 39.

Índice de esbeltez	Classificação	Tipo de análise
$\lambda \leq 35$	curtos	não consideras efeitos de 2º ordem
$35 < \lambda \leq 90$	médios	considerar efeitos de 2º ordem
$90 < \lambda < 140$	esbeltos	análise estabilidade elástica e efeitos de 2º ordem
$140 < \lambda < 200$	muito esbeltos	análise estabilidade elástica e efeitos de 2º ordem

Tabela 39. Necessidade de análise de 2º ordem

Fonte: Próprio autor.

1.2.2 Excentricidade de 1ª ordem

A excentricidade de 1ª ordem corresponde a distância e_1 da força normal de compressão N e do centroide da seção transversal, sendo a força N atuante em um eixo de simetria da seção. A força N pode ser substituída por um par de esforços (N, M) , onde M corresponde ao momento fletor de cálculo resultante da excentricidade (Araújo, 2010).

A Tabela 40 traz as possibilidades para excentricidade de 1ª ordem.

Força Normal	Excentricidade de 1º ordem
Centrada e $M = 0$	$e_1 = 0$
Aplicada à distância a do CG e $M = 0$	$e_1 = a$
Centrada	$e_1 = M/N$
Aplicada à distância a do CG	$e_1 = a + M/N$

Tabela 40. Excentricidade de 1º ordem

Fonte: Próprio autor.

1.2.3 Excentricidade accidental

Segunda a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), para dimensionamento ou verificação de lances de pilar é preciso considerar o efeito do desaprumo ou não retilineidade do pilar. A excentricidade accidental é dada pela EQUAÇÃO 2:

$$e_a = \theta_1 \frac{H}{2} \quad \theta_1 = \frac{1}{100\sqrt{H}} \quad (2)$$

Onde H é a altura do lance e $\theta_{1\text{mín}} = 1/300$ é considerado para estruturas reticuladas e imperfeições globais.

1.2.4 Excentricidade de 2ª ordem

A NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), no item 15.7.4, traz que a análise de 2ª ordem fornece apenas os esforços nas extremidades das barras, devendo ser realizada uma análise dos efeitos locais de 2º ordem ao longo dos eixos das barras comprimidas, podendo ser desprezado em elementos isolados quando o índice de esbeltez for menor que o valor-limite λ_1 dado por:

$$\lambda_1 = \frac{25 + 12,5 \cdot e_1/h}{\alpha_b} \quad (3)$$

De acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), os efeitos locais de 2ª ordem em pilares podem ser avaliados por quatro métodos, conforme Tabela 41.

$0 \leq \lambda \leq \lambda_1$ Dispensa análise dos efeitos de 2º ordem	
$\lambda_1 < \lambda \leq 90$	Métodos baseados no Pilar-Padrão
$90 < \lambda < 140$	Método do Pilar-Padrão Melhorado
$140 < \lambda < 200$	Método Geral

Tabela 41. Métodos de dimensionamento

Fonte: Próprio autor.

1.2.5 Solicitações normais nos pilares

Segundo Fusco (1981), as solicitações normais são aquelas que produzem tensões normais nas seções transversais das peças, ou seja, momento fletor e força normal. Nos princípios da Resistência dos Materiais os esforços solicitantes são referidos ao centro de gravidade da seção transversal.

De acordo com Pfeil (1976), Flexão Composta Oblíqua apresenta força normal e momentos fletores relativos às duas direções principais do pilar.

Os pilares de pontes, isolados ou em pórticos, são dimensionados à flexão composta oblíqua devido às combinações das variadas solicitações, como peso próprio, cargas moveis, vento, temperatura, frenagem, além dos efeitos das deformações que produzem acréscimo nos momentos fletores (efeito de flambagem).

2. Metodologia

Baseada na caracterização do Viaduto II da FCA, com a análise dos elementos geométricos constituintes de acordo com os projetos estruturais originais, definição dos materiais utilizados e das ações consideradas, de acordo com a NBR 6118:2014, objetiva-se através da modelagem da estrutura do viaduto, no software STRAP, reavaliar os esforços solicitantes e efetuar verificações das seções transversais dos pilares, determinando seções críticas, segundo análise de tensões últimas, com auxílio do software Oblíqua 1.0.

2.1 Caracterização do viaduto em estudo

O Viaduto II da FCA, entre Araguari/MG e Goiandira/GO foi projetado em 1960 com a finalidade de transportar minérios. Os projetos seguiram as prescrições das normas NB 1:1960 – Projeto e Execução de Obras de

Concreto Armado, NB 2:1961 – Cálculo e Execução de Pontes em Concreto Armado e NB 7:1943 – Cargas Móveis em Pontes Ferroviárias.

De acordo com os tipos estruturais apresentados por Leonhardt (1979) o sistema estrutural em estudo enquadra-se como viaduto em vigas sobre dois apoios, em vários vãos, sendo que todos os elementos estruturais foram moldados in loco. As ligações entre vigas e pilares se dão por meio de articulações do tipo Freyssinet, em alguns casos, Neoflon, não caracterizando uma ligação monolítica e assim um sistema estrutural em pórtico. As juntas de dilatação estão no pilar P4 e P8, pontos nos quais o viaduto é dividido em três módulos. Dessa maneira, tem-se que a superestrutura é hiperestática.

Como apresentado, o viaduto está dividido em três módulos por juntas de dilatação, tendo em vista problemas de retração, temperatura, frenagem e aceleração. Assim sendo, optou-se no presente estudo por analisar isoladamente o segundo módulo do viaduto, apresentado na **Figura 94**.

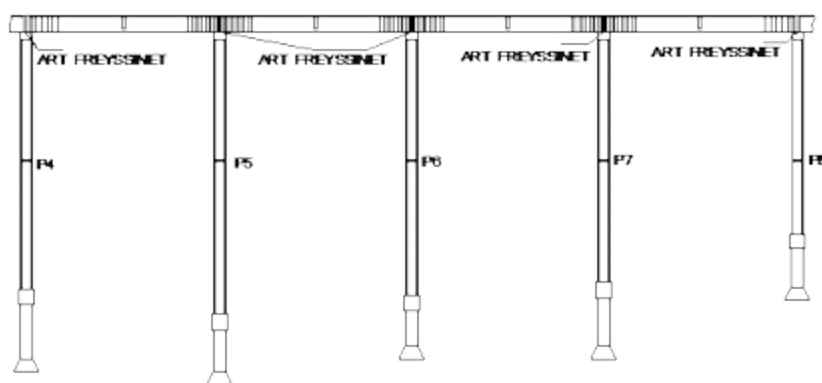


Figura 94. Módulo 2 do viaduto

Fonte: Próprio autor.

As vigas do viaduto, visto a grande altura dos pilares, são em seção caixão, para que a estrutura tenha maior rigidez e possa absorver os esforços advindos do tabuleiro. Este possui largura de 5,10 metros e comprimento de 120,50 metros dividido em quatro trechos delimitados pelos cinco pilares, sendo os trechos internos de 30,00 metros e os trechos externos de 30,25

Figura 95. Corte horizontal da superestrutura

A estrutura do viaduto é em concreto armado, com aço CA50, concreto C20 na superestrutura e na mesoestrutura. Assim, tem-se os valores apresentados na TABELA 42.

[illegible]

Superestrutura	25	10^{-5}	22	1,648	3,062	26266,3	22457,68	9357,37	0,2
Mesoestrutura	25	10^{-5}	22	1,648	3,062	26266,3	22457,68	9357,37	0,2

Tabela 42. Valores dos parâmetros do concreto
 Fonte: Próprio autor.

Com relação à durabilidade da estrutura, considera-se para efeitos de projeto uma classe de agressividade ambiental I, correspondente a zonas rurais. Dessa forma o cobrimento nominal das vigas e pilares é de 25 mm.

2.2 Geometria do modelo

Entre mesoestrutura e infraestrutura tem-se o apoio do tipo engaste. Dado o apoio fixo Freyssinet entre vigas e pilares, tem-se a rotulação do início das barras que ligam a superestrutura com a mesoestrutura, com liberação de M_2 e M_3 , sendo estes os momentos fletores presentes nas barras nas direções 1 e 2, segundo a nomenclatura adotada. Na Figura 96, podemos identificar as dimensões e a denominação de cada tipo de seção, conforme a Tabela 43.

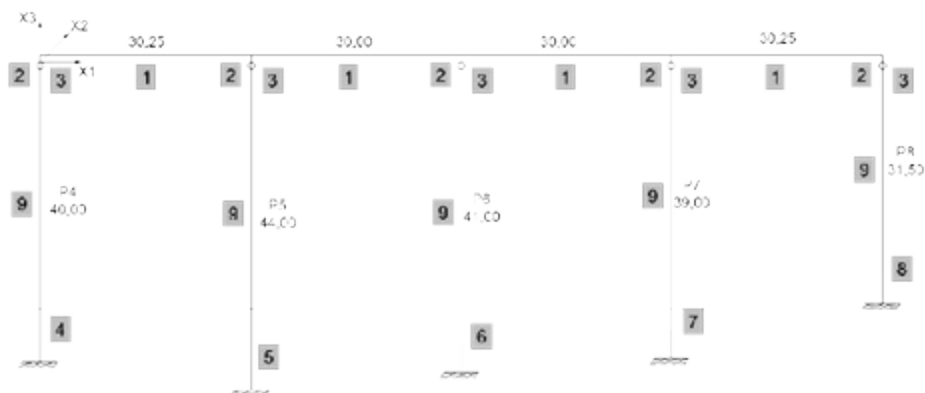
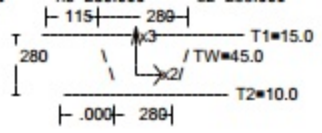
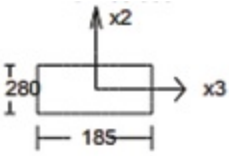
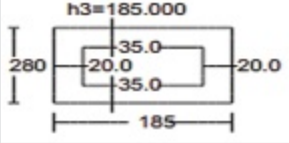
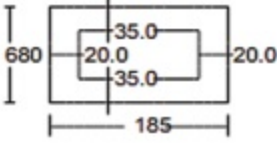
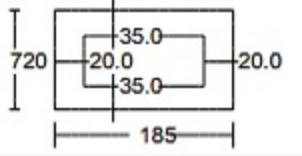
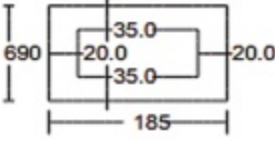


Figura 96. Propriedades das barras do modelo
 Fonte: Próprio autor.

Propriedade	Seção	Características	Dimensões
		$A = 0,334.10^5$	

1	Caixão	$I_2 = 0,3.10^9$	
		$I_3 = 0,5.10^9$	
		$J = 0,3.10^9$	
2	Retangular	$A = 0,518.10^5$	
		$I_2 = 0,1477.10^9$	
		$I_3 = 0,3384.10^9$	
		$J = 0,3489.10^9$	
3	Caixa	$A = 0,2135.10^5$	
		$I_2 = 0,9439.10^8$	
		$I_3 = 0,2265.10^9$	
		$J = 0,1927.10^9$	
4	Caixa	$A = 0,3735.10^5$	
		$I_2 = 0,208.10^9$	
		$I_3 = 0,2105.10^9$	
		$J = 0,6128.10^9$	
5	Caixa	$A = 0,3895.10^5$	
		$I_2 = 0,2148.10^9$	
		$I_3 = 0,2436.10^{10}$	
		$J = 0,6557.10^9$	
6	Caixa	$A = 0,3775.10^5$	
		$I_2 = 0,2066.10^9$	
		$I_3 = 0,2185.10^{10}$	
		$J = 0,6235.10^9$	
		$A = 0,3695.10^5$	

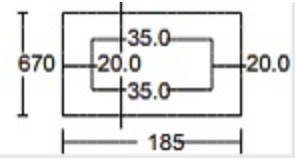
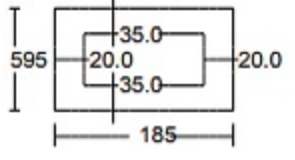
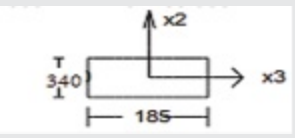
7	Caixa	$I_2 = 0,2011.10^9$	
		$I_3 = 0,2027.10^{10}$	
		$J = 0,6021.10^9$	
8	Caixa	$A = 0,3395.10^5$	
		$I_2 = 0,1806.10^9$	
		$I_3 = 0,1499.10^{10}$	
		$J = 0,5220.10^9$	
9	Retangular	$A = 0,6290.10^5$	
		$I_2 = 0,1794.10^9$	
		$I_3 = 0,6059.10^9$	
		$J = 0,4734.10^9$	

Tabela 43. Propriedades das barras 1 a 4 (cm)

Fonte: Próprio autor.

O STRAP cria seções automaticamente quando a seção transversal da peça é variável. Como os pilares têm seção transversal variável, destacam-se as propriedades das seções iniciais e finais de cada um. A propriedade 9 representa o travamento dos pilares.

2.3 Solicitações na estrutura

As cargas aplicadas na estrutura são definidas a partir das considerações normativas discutidas no item 1.1. Os valores finais destas cargas se encontram na Tabela 44.

Cargas permanentes		Cargas variáveis					
Direta	Indireta	Direta					Indireta

PP lastro (kN/m)	Retração (°C)	Choque lateral (kN/m)	Frenagem (kN/m)	Aceleração (kN/m)	Vento car. (kN/m)	Vento descar. (kN/m)	Temp. (°C)
35,55	25	0,597	18,59	2,98	6,87	5,05	5

Tabela 44. Cargas na estrutura

Fonte: Próprio autor.

O veículo é considerado do início para o fim da faixa única de tráfego, com $= 1,34$.

2.3.1 Combinações de carregamento

As combinações dos carregamentos são realizadas utilizando os coeficientes descritos na norma NBR 8681:2004 (ABNT, 2004), sendo aplicados segundo o tipo da carga (ação permanente, variável principal ou variável secundária), conforme a classificação dos carregamentos descritos anteriormente.

3. Discussão e resultados

Baseado na caracterização e modelagem do Viaduto II da FCA, no software STRAP versão 2012, com a análise dos elementos geométricos constituintes, de acordo com os projetos estruturais originais, e definição dos materiais utilizados e ações consideradas, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), tem-se nesse capítulo os esforços solicitantes, a verificação das seções transversais dos pilares, segundo análise de tensões últimas, com auxílio do software Oblíqua 1.0, além da discussão dos resultados.

3.1 Envoltória dos esforços

Tem-se na TABELA 45 o resumo dos valores máximos, na base e no topo, de momentos fletores (kN.m) e esforço normal (kN), os quais serão empregues na verificação da mesoestrutura.

Pilar	M ₂ (kN.m)		M ₃ (kN.m)		N (kN)	
	Base	Meio	Base	Meio	Base	Meio
P4	4772	4772	4772	4772	4772	4772
P5	7949	7949	7949	7949	7949	7949
P6	9065	9065	9065	9065	9065	9065
P7	7567	7567	7567	7567	7567	7567
P8	3550	3550	3550	3550	3550	3550

Tabela 45. Máximos esforços

Fonte: Próprio autor.

3.2 Verificação da mesoestrutura

Como abordado por Pfeil (1983), pilares de pontes são dimensionados considerando flexão composta oblíqua. É sabido que as soluções por processos numéricos são muito trabalhosas. Dessa forma, faz-se necessária a abordagem do problema em programas computacionais de otimização das seções, supondo uma área inicial de aço e verificando se tal área é satisfatória, ou seja, o esforço solicitante é contido na envoltória dos esforços resistentes. Assim, para realização da verificação das seções empregou-se o *software* Oblíqua 1.0 (2001) da Universidade Federal do Paraná.

A compatibilização da orientação dos eixos na seção transversal do *software* STRAP com o Oblíqua 1.0 são feitas de modo que o eixo x₂ e o x₃ correspondem ao eixo x e y, respectivamente.

Assim, de posse do detalhamento da armadura dos pilares do Viaduto II da FCA, feito pelo 2º Batalhão Ferroviário em 1970, fez-se a análise das seções de base e meio dos 5 pilares do 2º módulo do viaduto. De acordo com o diagrama de esforços resultantes do *software* STRAP (2012) e das seções de cada pilar, fez-se o lançamento no *software* Oblíqua, para geração do diagrama de interação, com a apresentação dos momentos resistentes no eixo x e y.

Portanto, o resumo dos momentos solicitantes e momentos resultantes de cada pilar, para as seções do meio e da base estão apresentados na Tabela 46.

P	MSd,x		MSd,x		MSd,y		MRd,y		Situação	
	Base	Meio	Base	Meio	Base	Meio	Base	Meio	Base	Meio
P4	-4772	-2387	39507	25901	-16600	-8300	10687	9894	$MSd,y > MRd,y$	Ok
P5	-7949	-3975	51487	32034	-14400	-7200	13420	11976	$MSd,y > MRd,y$	Ok
P6	-9065	-4532	48513	30478	-16000	-8000	13157	11729	$MSd,y > MRd,y$	Ok
P7	-7567	-3783	47621	30287	-17300	-8650	13393	11950	$MSd,y > MRd,y$	Ok
P8	-3550	-1775	34002	21455	-20900	-10450	9675	8464	$MSd,y > MRd,y$	$MSd,y > MRd,y$

Tabela 46. Resumo dos momentos (em kN.m)

Fonte: Próprio autor.

Assim, da avaliação dos resultados, observa-se que a seção transversal da base dos pilares possui momento solicitante em y maior que o momento resistente. Já na seção transversal do meio dos pilares P4, P5, P6 e P7 os momentos solicitantes em x e y são menores que os momentos resistentes. O fato dos pilares possuírem momentos solicitantes maiores que os momentos resistentes, ao se considerar a norma atualizada, não implica concretamente que a estrutura não mais suporte as solicitações atuantes, visto que a atualização da norma não invalida a versão anterior. De acordo com a observação do memorial de cálculo do dimensionamento do viaduto em estudo, pode-se apresentar possíveis variáveis que influenciaram no resultado da pesquisa.

Dado que os pilares do 2º módulo do viaduto possuem índice de esbeltez maior que o limite para desconsideração das deformações (Esbeltez λ pilar P4=61,4; P5=63,1; P6=59; P7=59,3; P8=53,4), segundo a NB 1:1960 o processo de cálculo a ser seguido era o Processo ω .

Assim, segundo este procedimento, é utilizada uma carga centralizada majorada, para considerar a flambagem no elemento separadamente dos momentos fletores. A armadura é tomada para o pior caso, inferindo que o momento fletor não interferia na instabilidade da peça sob compressão. Todavia, quando se tem efeitos de 2º ordem, a verificação correta é feita com relação à instabilidade na flexão composta oblíqua, pois o concreto não é um material elástico-linear e não é possível garantir que a peça atenda a hipótese básica da teoria da flambagem, ou seja, compressão centrada. Dessa forma, o procedimento de cálculo da norma atualizada para pilares está reformulado, com introdução da excentricidade accidental e da consideração da verificação à instabilidade na flexocompressão, o que resulta em uma maior área de aço.

Observou-se ainda que o objeto de estudo não se adequa na íntegra aos conceitos da norma atualizada no que diz respeito à durabilidade da estrutura. O cobrimento nominal dos elementos constituintes do viaduto respeitam os valores definidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Porém, as definições com relação a projetos que facilitem os procedimentos de inspeção e manutenção preventiva da construção não são verificadas, visto que o viaduto não contém guarda-corpo ou acesso facilitado à mesoestrutura.

Em relação às considerações das ações para o dimensionamento do viaduto, como massa específica, carga de vento, retração, coeficiente de dilatação térmica, avaliação do choque lateral e deformação lenta, observa-se que não houve mudanças decorrentes da atualização da norma.

Quanto às propriedades do concreto, o módulo de deformação tangente inicial e o módulo de deformação secante diferem da norma anterior para a atualizada. O módulo de deformação tangente inicial, reta tangente à curva na

origem do gráfico de tensão-deformação, tem valor maior ao empregar a expressão apresentada na NB 1. Logo, admite-se que para uma mesma força atuante na peça, a norma de 1960 daria uma deformação menor que a norma de 2014. Já com relação ao módulo de deformação secante, a equação da NB 1 resulta em um valor menor que o dado pela equação da NBR 6118:2014. Analisa-se ainda que o diagrama tensão-deformação passou a ter uma expressão mais generalizada

Outra variável a ser ressaltada quanto aos resultados da pesquisa se relaciona ao trem-tipo utilizado no dimensionamento do viaduto. Esse parâmetro é muito variável visto que a concessionária pode definir a quantidade de locomotivas e vagões, além da variação existente entre a densidade dos materiais transportados. Sendo assim, a carga do trem tipo adotado influencia na resistência da seção até certo nível de carregamento. Dessa forma, o principal efeito da atualização da NBR 6118 nos pilares de viadutos ferroviários está na necessidade de maior área de aço para as seções transversais, tendo em vista uma análise sem separação dos esforços (normais e momentos fletores) quando o pilar está submetido a flexocompressão. Como os resultados obtidos pela verificação das seções transversais apresentam-se próximos do adequado, é interessante a realização de trabalhos futuros neste aspecto.

Conclusões

A partir dos resultados apresentados, é possível se concluir a atualização do dimensionamento da ponte estudada utilizando a NBR 6118 como base, ressaltando as principais mudanças existentes nas considerações de projeto, desde as considerações de carregamentos atuantes na estrutura até a atuação conjunta dos esforços. Tais mudanças influenciam diretamente nos resultados finais de dimensionamento, aumentando assim resistência dos elementos e a segurança na utilização da estrutura.

Tendo em vista a modelagem realizada no software STRAP, versão 2012, com consideração da análise P-delta e as verificações realizadas no software Oblíqua 1.0 as seções da base dos pilares do 2º módulo do viaduto em estudo possuem momentos solicitantes maiores que os momentos resistentes. Contudo, pela análise das envoltórias geradas pelo software Oblíqua 1.0, é possível observar que a maioria dos pilares possui momentos solicitantes ligeiramente próximos da envoltória de resistência, com ressalva para o pilar P8. Essa diferença pode ser justificada pela reformulação dos procedimentos de cálculo da NB 1:1960 para a NBR 6118:2014 que imprimiu maior segurança às estruturas ao considerar a análise por instabilidade na flexocompressão para pilares submetidos a esforço normal e momentos fletores.

Dessa forma, o principal efeito da atualização da NBR 6118 nos pilares de viadutos ferroviários está na necessidade de maior área de aço para as seções transversais, tendo em vista uma análise sem separação dos esforços (normais e momentos fletores) quando o pilar está submetido a flexocompressão. Como os resultados obtidos pela verificação das seções transversais apresentam-se próximos do adequado, é interessante a realização de trabalhos futuros conforme sugestões a seguir.

- Análise da capacidade resistente do sistema estrutural do viaduto ferroviário estudado, desconsiderando os coeficientes de ponderação;
- Avaliação do sistema estrutural do viaduto ferroviário estudado por meio da realização de prova de carga estática e ensaios não-destrutivos para caracterização do concreto;
- Avaliação e identificação de patologias estruturais e não estruturais no viaduto estudado, por meio de ensaios não destrutivos e inspeção visual com auxílio de um drone.

Referências

- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado – Volume 3**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Força devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7189**: Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias. Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ATIR Engeneering Software. **STRAP 2012 – Structural Analysis Programs**. Israel, 2012.
- CERUTTI, R. M.; SANTOS, S. H. C. Impactos no projeto estrutural da versão 2014 da norma brasileira ABNT NBR 6118. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 8, n. 4, 2015.
- FUSCO, Pericles Brasiliense. **Estruturas de concreto – solicitações tangenciais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- LEONHARDT, Fritz. **Construções de concreto, vol. 6**. Rio de Janeiro: Interciência, 1979.
- MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. 1.ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2008.
- MARQUES, Fernando Miguel de S. **Avaliação do comportamento estrutural e análise de fadiga em pontes metálicas ferroviárias**. 2006. 270 f. Dissertação (mestrado) – Universidade do Porto, Porto.
- PFEIL, Walter. **Concreto armado, vol. 2**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983.
- _____. **Dimensionamento do concreto armado à flexão composta**. Rio de Janeiro: LTC, 1976.
- _____. **Pontes em concreto armado vol. 1**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983.
- _____. **Pontes em concreto armado vol. 2**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC,

1983.

SCADELAI, Murilo Alessandro. **Dimensionamento de pilares de acordo com a NBR 6118:2003**. 2004. 136 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de concreto, vol. 2**. Rio de Janeiro: Globo, 1984.

ZANDONÁ, Cicero Augusto W.; et al. **OBLÍQUA 1.0**. Paraná: CESEC, 2001.

Notas

72. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: ananivia.pantoja@gmail.com.

73. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Bolsista CAPES. Contato: sena.joaopedro42@gmail.com.

74. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Bolsista Fapeg. Contato: eng.pedromelo@hotmail.com.

75. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: wellington.andrade@gmail.com.

Projeto de um absorvedor dinâmico de vibrações sujeito a incertezas na massa e rigidez

*Layane Rodrigues de Souza Queiroz*⁷⁶

*Romes Antonio Borges*⁷⁷

Resumo: Diferentes métodos têm sido utilizados para lidar com a propagação de incertezas em sistemas mecânicos, entre eles, o Caos Polinomial. A expansão em Caos Polinomial considera na resposta aleatória a separação das componentes estocásticas e determinísticas, fazendo o uso de polinômios ortogonais e de variáveis aleatórias que representam as incertezas. Como sistemas mecânicos estão sujeitos a diferentes níveis de vibrações, propõe-se o projeto de um sistema massa-mola, com aplicação na construção de absorvedores dinâmicos de vibração. Nesta pesquisa, determina-se a massa e a constante de rigidez, ambas sujeitas a incertezas e associadas ao absorvedor, para que a amplitude de vibração do sistema primário seja minimizada. Para tanto, aplica-se um algoritmo genético para resolver o problema de otimização. Os experimentos numéricos indicam que o absorvedor pode ter os parâmetros incertos variando em cerca de até 6% dos valores adotados para o sistema primário.

Palavras-chave: Atuador dinâmico de vibrações. Caos polinomial. Algoritmos genéticos.

Introdução

O projeto de sistemas da engenharia é de grande importância para a sociedade. Em muitos casos, o projeto requer a determinação de parâmetros ótimos a fim de diminuir os custos envolvidos e, assim, ter resultados

competitivos. Como os sistemas mecânicos podem sofrer com os níveis de vibração do ambiente e/ou de outros sistemas, pode-se reduzir o nível de energia vibratória existente com o uso de absorvedores dinâmicos de vibrações.

Um Absorvedor Dinâmico de Vibração (ADV) deve ser projetado para atenuar os principais níveis de vibração que o sistema mecânico possa originar. A estrutura básica de um ADV contempla um elemento de massa e outro de rigidez, podendo também incluir um elemento de amortecimento. Segundo Méndez (2014), os ADVs podem ser classificados em passivos, que atuam em certas faixas de frequência (Lara, 2007); ativos, que variam a faixa de operação conforme a variação da força externa (Harris, 2003); adaptativos, que têm suas características ajustadas de acordo com as variações na frequência e podem contar com materiais inteligentes na sua construção (Acar; Yilmaz, 2012); e, multimodais, que conseguem controlar as vibrações simultaneamente em diferentes faixas de frequência (Barros, 2009).

Na literatura é comum encontrar o uso de ADVs, por exemplo em Vale (2006), que considerou o controle de vibrações em reatores; Anh, Matsuhira e Yasuda (2007), que utilizaram um absorvedor passivo para o controle de vibrações em um pêndulo invertido; Samani e Pellicano (2009), que consideraram vigas sujeitas às cargas em movimento; Liu e Shao (2011), que buscaram controlar o nível de vibração em trilhos; Shen et al. (2016), que projetaram um absorvedor para a suspensão de veículos; Lee e Lin (2017), que introduziram um transdutor piezelétrico no projeto de um absorvedor para controlar o nível de vibração em plataformas.

O objetivo desta pesquisa é projetar um ADV passivo que está sujeito a incertezas, o qual deve ser acoplado a um sistema primário do tipo massa-mola visando atenuar os seus níveis de vibração. Para o projeto, considera-se a resolução de um problema de otimização que visa determinar a massa e a rigidez da mola associadas ao absorvedor, de forma a minimizar a amplitude

de vibração do sistema primário. O problema de otimização é resolvido por um algoritmo genético básico. Nessa linha, Galavotti (2010) utilizou um algoritmo genético a fim de otimizar a amplitude de vibração considerando o acoplamento de um ADV com um atuador piezelétrico. Méndez (2014) projetou um ADV multimodal a partir da aplicação do método de elementos finitos junto com um algoritmo genético e a evolução diferencial. Esen e Koç (2015) utilizaram o método de elementos finitos para modelar o comportamento não linear de um cano de uma arma ao se realizar um disparo, considerando o acoplamento de um ADV passivo cujos parâmetros foram obtidos por um algoritmo genético.

Uma vez que a massa e a mola do ADV sendo projetado são elementos com características incertas, aplica-se a expansão em Caos Polinomial homogêneo para quantificar as incertezas na resposta do sistema (Ghanem; Spanos, 1991). No Caos Polinomial ocorre uma separação entre a parte estocástica e a determinística, o que torna necessário obter os coeficientes da expansão para se chegar nas estatísticas da resposta (média e variância). Uma forma de obter os coeficientes é aplicando a projeção de Galerkin ou uma aproximação por colocação de pontos.

Trabalhos envolvendo o Caos Polinomial foram desenvolvidos, por exemplo, em Pimentel (2014), que considerou a projeção de Galerkin e uma aplicação sobre problemas de transferência de calor e massa. Em Li et al. (2016), uma equação de convecção-difusão foi transformada em um sistema de equações determinísticas acopladas a partir da aplicação do Caos Polinomial. Jacquelin et al. (2016) estudaram um sistema dinâmico com incertezas descritas por variáveis aleatórias e *fuzzy* representadas pelo Caos Polinomial. Keshavarzzadeha, Fernandez e Tortorellia (2017) desenvolveram uma abordagem que combina o Caos Polinomial e a análise sensível para a otimização da topologia de estruturas na presença de incertezas.

As próximas seções do trabalho trazem a descrição do método do Caos Polinomial homogêneo, que usa a base de polinômios de Hermite; o sistema sendo projetado, em que se aplica o Caos Polinomial e define o problema de otimização com as variáveis e restrições; os resultados encontrados a partir de experimentos numéricos, sendo obtidos os valores para o projeto do ADV; e, as conclusões obtidas e trabalhos que podem ser desenvolvidos no futuro.

1. Caos Polinomial

O Caos Polinomial com base em polinômios de Hermite é chamado de homogêneo devido ao seu desenvolvimento sobre a teoria do caos homogêneo de Wiener. Apesar da versão homogênea ser utilizada também para lidar com processos envolvendo outros tipos de polinômios ortogonais, a convergência do Caos Polinomial torna-se lenta. Por isso, uma versão generalizada do Caos Polinomial foi proposta envolvendo o uso de bases de polinômios ortogonais do esquema de Askey (Schoutens, 1999).

Conforme Ghanem e Spanos (1991), uma resposta aleatória $X(w)$ pode ser escrita como uma expansão infinita em termos de coeficientes x_j e polinômios Φ_j , que são ortogonais em termos de variáveis aleatórias gaussianas independentes ξ , ou seja:

$$X(w) = \sum_{j=0}^{\infty} x_j \Phi_j(\xi) \quad (1)$$

A expansão na Eq. (1) é truncada quando considerando aplicações reais, tal que se usa um número finito n de variáveis aleatórias e uma expansão de ordem máxima p . Além disso, a base ortogonal de polinômios $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots\}$ mantém a relação de que o produto interno coincide com o valor esperado no espaço de Hilbert, sendo calculado por meio de uma integral, isto é:

$$\langle \Phi_i, \Phi_s \rangle = \int \Phi_i(\xi) \Phi_s(\xi) p(\xi) d\xi \quad (2)$$

Na Eq. (2), a integral está definida para o intervalo $(-\infty, \infty)$, dado o Caos Polinomial homogêneo e $\rho(\xi)$ representa a função peso dos polinômios ortogonais de Hermite, que está associada a função densidade de probabilidade de variáveis aleatórias gaussianas. Além disso, o polinômio Φ_j , de ordem p e dimensão n dado pelo número de variáveis aleatórias, é escrito como:

$$\Phi_j = (-1)^n \left(e^{1/2 \xi^T \xi} \right) \left(\frac{\partial^n}{\partial \xi_1 \partial \xi_2 \dots \partial \xi_n} e^{-1/2 \xi^T \xi} \right) \quad (3)$$

No caso da expansão em Caos Polinomial generalizado, as variáveis aleatórias em ξ **não são necessariamente gaussianas. Neste caso, escolhe-se uma base de polinômios ortogonais do esquema de Askey conforme a distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias que representam as incertezas** no sistema. Consequentemente, a integral na Eq. (2) deve considerar a função peso conforme a base de polinômios utilizada, bem como se deve usar o intervalo de integração apropriado para essa base.

Os coeficientes x_j na Eq. (1) são obtidos pela projeção de Galerkin, em que se projeta a resposta com relação a cada polinômio da base Φ por meio do produto interno, resultando em:

$$X_j = \frac{\int_c X(\xi) \Phi_j(\xi) \rho(\xi) d\xi}{\langle \Phi_j(\xi), \Phi_j(\xi) \rangle} \quad (4)$$

Com os coeficientes obtidos na Eq. (4), calculam-se as estatísticas da resposta aleatória, as quais são expressas em termos da média e da variância, sendo respectivamente:

$$\mu_x = X_0 \quad (5)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_{j=0}^{\infty} x_j^2 \langle \Phi_j^2 \rangle \quad (6)$$

2. Projeto de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações com Incertezas

Seja um ADV passivo acoplado a um sistema massa-mola primário sujeito a uma força externa, conforme ilustra a Figura 97. Assume-se que $x_1(t)$ e $x_2(t)$ representam o deslocamento na direção vertical para as massas m_1 e m_2 , respectivamente. As molas que conectam a massa m_1 na base fixa e a massa m_2 na massa m_1 possuem rigidez k_1 e k_2 , respectivamente. A força externa $F(t)$ é harmônica e tem frequência angular ω .

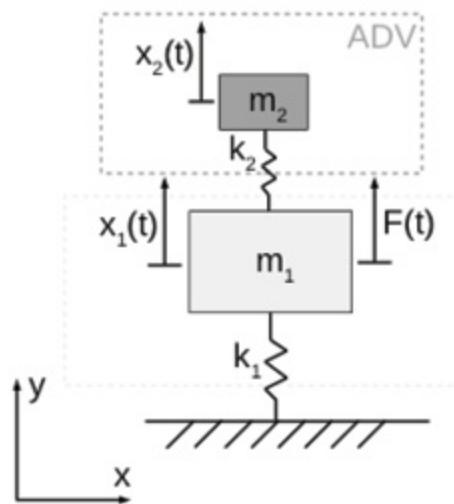


Figura 97. Sistema massa-mola primário com a atuação de um ADV

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 97 há um sistema mecânico cuja equação de movimento é dada na Eq. (7). Para que o sistema formado pela massa m_2 e mola com rigidez k_2 atue como um ADV, deve-se escolher valores adequados para m_2 e k_2 de forma que a amplitude do sistema primário seja próxima de zero ou até mesmo nula.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \cos(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Considera-se a solução da Eq. (7) na forma $x_1(t) = X_1 \cos(\omega t)$ e $x_2(t) = X_2 \cos(\omega t)$, tal que se chega em equações em função de X_1 e X_2 , ou

seja:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2)k_2} \begin{bmatrix} k_2 - m_2 \omega^2 & k_2 \\ k_2 & k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

O resultado de X_1 e X_2 na Eq. (8) representa a magnitude da vibração para as massas m_1 e m_2 , respectivamente (INMAN, 2013). Assim, para que o ADV atue no sentido de anular a magnitude de vibração do sistema primário, deve-se escolher valores de m_2 e k_2 que satisfaçam $\omega^2 = \frac{k_2}{m_2}$

Por outro lado, assume-se que a massa e a rigidez da mola associada ao ADV estão sujeitas a incertezas, sendo representadas em termos de variáveis aleatórias gaussianas independentes, em que se aplica a expansão em Caos Polinomial homogêneo. Assim, os parâmetros incertos podem ser escritos na forma de uma expressão de Karhunen-Loève finita, em que se assume uma variável aleatória por parâmetro, resultando, respectivamente, em:

$$\tilde{m}_2 = \bar{m}_2 + \sum_{j=1}^1 \xi_j g_j = m_2 + \xi_1 \sigma_{m_2} \quad (9)$$

$$\tilde{K}_2 = \bar{K}_2 + \sum_{i=2}^2 \xi_i g_i = K_2 + \xi_2 \sigma_{k_2} \quad (10)$$

Nas Eqs. (9) e (10), tem-se que $\bar{m}_2$ e $\bar{K}_2$ representam as médias, que são assumidas iguais aos respectivos valores nominais m_2 e k_2 ; $g_1 = \sigma_{m_2}$ e $g_2 = \sigma_{k_2}$ são os respectivos valores do desvio padrão para a massa e a rigidez; e, ξ_1 e ξ_2 são as respectivas variáveis aleatórias usadas para representar as incertezas da massa e da rigidez.

O próximo passo consiste em propagar as incertezas no sistema, isto é, substituir as Eqs. (9) e (10) na Eq. (8), resultando em:

$$\begin{bmatrix} K_1 + (K_1 + \xi_2 \sigma_{k_2}) - m_1 \omega^2 & -(K_2 + \xi_2 \sigma_{k_2}) \\ -(K_2 + \xi_2 \sigma_{k_2}) & -(K_2 + \xi_2 \sigma_{k_2}) - (m_2 + \xi_1 \sigma_{m_2}) \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dada a presença de incertezas no sistema da Figura 97, considera-se a sua resposta sendo representada por uma expansão em Caos Polinomial finita com $n=2$ variáveis aleatórias e um polinômio de ordem máxima $p=2$, isto é:

$$\begin{aligned} X_1 &= \sum_{i=0}^5 X_{1,i} \theta_i(\xi_1, \xi_2) = X_{1,0} \theta_0 + X_{1,1} \theta_1 + X_{1,2} \theta_2 + X_{1,3} \theta_3 + X_{1,4} \theta_4 + X_{1,5} \theta_5 \\ X_2 &= \sum_{j=0}^5 X_{2,j} \theta_j(\xi_1, \xi_2) = X_{2,0} \theta_0 + X_{2,1} \theta_1 + X_{2,2} \theta_2 + X_{2,3} \theta_3 + X_{2,4} \theta_4 + X_{2,5} \theta_5 \end{aligned} \quad (12)$$

Os polinômios de Hermite bidimensionais calculados com base na Eq. (3) são: $\Phi_0=1$, $\Phi_1=\xi_1$, $\Phi_2=\xi_2$, $\Phi_3=\xi_1^2-1$, $\Phi_4=\xi_1 \xi_2$ e $\Phi_5=\xi_2^2-1$, tal que $\langle \Phi_0 \rangle = 1$, $\langle \Phi_1 \rangle = \langle \Phi_2 \rangle = \langle \Phi_3 \rangle = \langle \Phi_4 \rangle = \langle \Phi_5 \rangle = 0$, $\langle \Phi_0^2 \rangle = \langle \Phi_1^2 \rangle = \langle \Phi_2^2 \rangle = \langle \Phi_4^2 \rangle = 1$ e $\langle \Phi_3^2 \rangle = \langle \Phi_5^2 \rangle = 2$.

Em seguida, faz-se a projeção da base de polinômios sobre a resposta do sistema, isto é, após a substituição da Eq. (12) na Eq. (11), multiplica-se o resultado obtido por cada polinômio da base e, em seguida, toma-se o produto interno:

$$\left\langle \theta_r \begin{bmatrix} K_1 + (K_1 + \xi_2 \sigma_{k2}) - m_1 \omega^2 & -(K_2 + \xi_2 \sigma_{k2}) \\ -(K_2 + \xi_2 \sigma_{k2}) & (K_2 + \xi_2 \sigma_{k2}) - (m_2 + \xi_1 \sigma_{m2}) \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^5 X_{1,i} \theta_i \\ \sum_{j=0}^5 X_{2,j} \theta_j \end{bmatrix} \right\rangle = \langle \theta_r [F_0] \rangle \quad (13)$$

Com isso, obtém-se um conjunto de equações algébricas para X_1 e X_2 dado que $r=0, 1, \dots, 5$ na Eq. (13). O conjunto de equações resultante é determinístico e, assim, pode ser resolvido a fim de obter o valor médio e a variância da resposta X_1 e X_2 , que são expressas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \begin{cases} \mu_{X1} = X_{1,0} \\ \mu_{X2} = X_{2,0} \end{cases} & \quad (14) \\ \begin{cases} \sigma_{X1}^2 = X_{1,1}^2 + X_{1,2}^2 + X_{1,3}^2 + X_{1,4}^2 + 2X_{1,5}^2 \\ \sigma_{X2}^2 = X_{2,1}^2 + X_{2,2}^2 + X_{2,3}^2 + X_{2,4}^2 + 2X_{2,5}^2 \end{cases} & \quad (15) \end{aligned}$$

Com o intuito de minimizar a amplitude de vibração do sistema primário, ou mesmo anulá-la, o ADV representado pela a massa m_2 e a mola com rigidez k_2 , conforme mostra a Figura 97, deve ser capaz de absorver tal amplitude de vibração. Uma vez que os elementos do sistema primário sejam conhecidos e o projeto do ADV envolve determinar a sua massa e mola, ambos parâmetros com incertezas, considera-se o seguinte problema de otimização:

$$\text{Minimizar } f = \sqrt{(\mu_{x_1})^2} \quad (16)$$

$$\text{Sujeito a: } \begin{cases} \frac{1}{20} m_1 \leq m_2 \leq \frac{3}{10} m_1 \\ \frac{15}{100} k_1 \leq m_2 \leq \frac{4}{10} k_1 \\ \frac{1}{20} m_1 \leq m_2 \leq \frac{1}{10} m_1 \\ \frac{1}{20} k_1 \leq \sigma_{k_2} \leq \frac{1}{10} k_1 \end{cases} \quad (17)$$

O problema definido nas Eqs. (16) e (17) busca pela minimização do valor esperado da amplitude de vibração, na Eq. (14), para a resposta aleatória X_1 . Este valor corresponde a média da amplitude de vibração do sistema primário dada a aleatoriedade que foi propagada pelo sistema. Observa-se que para a minimização do valor esperado da amplitude, deve-se encontrar a solução das variáveis de projeto m_2 e k_2 e, ao mesmo tempo, determinar qual a variabilidade permitida para tais variáveis, isto é, determinar os valores de σ_{m_2} e σ_{k_2} .

3. Experimentos numéricos

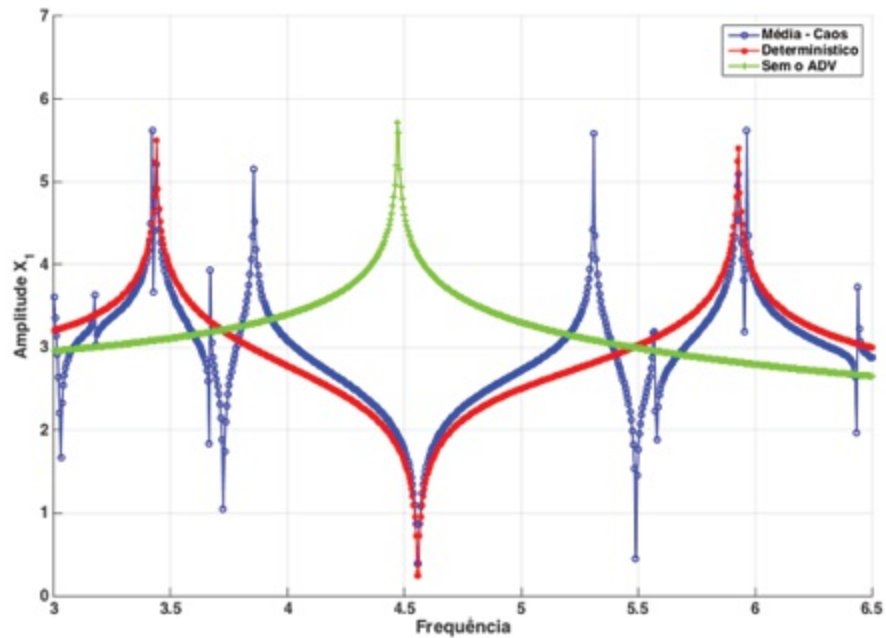
O problema de otimização definido nas Eqs. (16) e (17) é resolvido por um Algoritmo Genético básico,⁷⁸ chamado de AG e explicado com detalhes em Ferragud (1999). De forma geral, um AG trabalha sobre uma população de indivíduos com base na teoria da evolução natural, em que os melhores indivíduos são selecionados para reproduzir e passar suas informações

adiante. Assim, dada uma população, escolhem-se os melhores indivíduos, conforme uma função de avaliação, para realizarem o cruzamento. No cruzamento ocorre a combinação entre indivíduos bem avaliados, o que acaba gerando descendentes de qualidade. Após gerar os descendentes, aplica-se a mutação sobre um ou mais indivíduos a fim de trazer diversidade para a população e explorar outras regiões do espaço de busca. Com isso, uma nova população é gerada e os passos anteriores são repetidos até atingir algum critério de término.

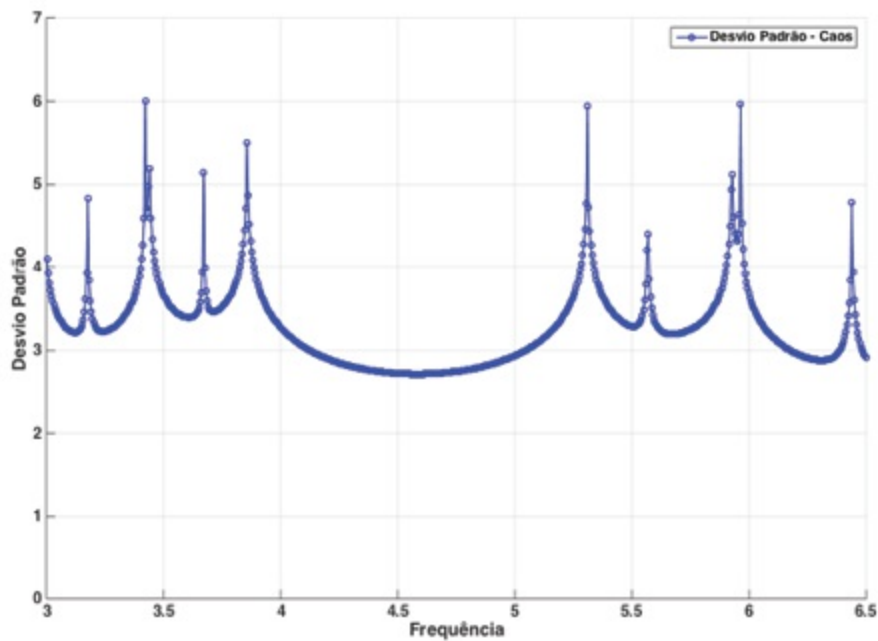
Os parâmetros utilizados no AG foram os seguintes: tamanho da população igual a 100, número de gerações igual a 1000, probabilidade de cruzamento igual a 0,7 e probabilidade de mutação igual a 0,05. Os valores adotados para os parâmetros do sistema primário foram: $m_1=100$, $k_1=2000$ e $F=1$, para a resposta em função da frequência. Uma vez que os valores de m_1 e k_1 são conhecidos à priori, as restrições laterais em (17) impõe que m_2 esteja no intervalo $[5\%, 30\%]m_1$; que k_2 seja definido no intervalo $[15\%, 40\%]k_1$; e, que os desvios dos parâmetros com incertezas estejam no intervalo $[5\%, 10\%]$ do respectivo valor nominal. Além disso, considera-se $\omega^2=k^2/m_2$ durante a otimização.

A resolução do problema de otimização pelo AG resultou nas seguintes variáveis de projeto: $m_2=29,8082$ e $k_2=619,1388$, com os respectivos desvios padrões sendo $\sigma_{m_2}=6,1873$ e $\sigma_{k_2}=112,3338$. Além disso, o valor da função objetivo, avaliada 100.100 pelo AG, foi de $f=4,8557 \times 10^{-19}$. A partir desses resultados, a Figura 98-A mostra o gráfico do valor esperado para a resposta aleatória de X_1 , na Eq. (14), o gráfico da resposta determinística de X_1 , obtida na Eq. (8), e o gráfico da solução determinística do sistema primário (sem o acoplamento do ADV). Por outro lado, a Figura 98-B traz o gráfico para o desvio padrão da resposta aleatória de X_1 , obtido

da Eq. (15). Nos gráficos, a frequência variou no intervalo de 3 a 6,5, o qual contém os picos de ressonância para o sistema primário sem e com o acoplamento do ADV.



(a) Amplitude para X_1



(b) Desvio padrão para X_1

Figura 98. Resposta (média e desvio padrão) do problema de otimização encontrada pelo AG

Fonte: Próprio autor.

Os resultados na Figura 98-A mostram que a solução determinística do sistema primário sem o ADV (na cor verde) possui um pico de ressonância próximo da frequência 4,4721. Observa-se que este pico foi eliminado no sistema primário com o acoplamento do ADV ao considerar o projeto resultante da aplicação do AG, em que o ADV passa a atuar sobre a frequência $\omega_2 = k_2/m_2 = 619,1388/29,8082 = 20,7707$, que é $\omega = 4,5574$.

Com isso, a amplitude de vibração do sistema determinístico para a massa m_1 (na cor vermelha) passa a ter dois novos picos de ressonância, que estão próximos das frequências 3,5 e 6, como pode ser visto claramente na Figura 98-A. Ao analisar o valor esperado (média) da resposta aleatória X_1 , dado pelo Caos Polinomial (cor azul na Figura 98), com relação a solução determinística, nota-se que as soluções convergem nos dois picos de ressonância. Todavia, a solução do Caos Polinomial é mais acentuada nos picos de antirressonância, além de apresentar novos picos de ressonância que a solução determinística não é capaz de prever. Soma-se a isto que na Figura 98-B o desvio padrão da resposta aleatória X_1 tem maior dispersão conforme os picos presentes na Figura 98a, para o Caos Polinomial.

Vale ainda mencionar que a solução do Caos Polinomial considera que o desvio padrão dos parâmetros incertos associados ao ADV, isto é, σ_{m2} , da massa m_2 , e σ_{k2} , da rigidez k_2 , podem variar até 6,19% de m_1 e 5,62% de k_1 , respectivamente. Acredita-se que a solução do Caos Polinomial deve divergir ainda mais da solução determinística quando se aumenta o valor do desvio padrão dos parâmetros incertos. Por outro lado, o desempenho do Caos Polinomial pode ser melhorado ao aumentar a ordem máxima assumida para a expansão.

Conclusões

Para o projeto de um ADV passivo com incertezas, considerou-se a aplicação da expansão em Caos Polinomial homogêneo para obter a média e o desvio padrão da resposta aleatória associada a amplitude de vibração do sistema. Além disso, no projeto do ADV, considerou-se que o sistema primário tem massa e rigidez conhecidas, enquanto se buscou determinar os valores de massa e rigidez do ADV que minimizam o valor esperado da amplitude de vibração do sistema primário, sendo a principal contribuição desta pesquisa para a literatura.

Os parâmetros encontrados para o ADV permitiram projetar um sistema que elimina o pico de ressonância do sistema primário sem o ADV. Além disso, o projeto considera que os valores encontrados para o ADV, isto é, para a sua massa e a rigidez, por serem parâmetros incertos, podem ter uma variabilidade em torno de até 6% (mais precisamente, 6,19% para m_2 e 5,62% para k_2) dos respectivos valores adotados para sistema primário. Esse resultado tem relevância no meio industrial, pois mostra que eventuais variações podem ocorrer na definição da massa e rigidez da mola do ADV sem trazer prejuízos para o seu correto funcionamento.

Assim, pode-se concluir que o Caos Polinomial fornece resultados coerentes com a variabilidade assumida para os parâmetros incertos, além de ser importante em projetos sujeito a incertezas, uma vez que o valor esperado da resposta tende a ser próximo da resposta determinística. Trabalhos futuros devem investigar a influência dos valores adotados para o desvio padrão dos parâmetros incertos na resposta aleatória do sistema.

Referências

ACAR, M. A.; YILMAZ, C. Design of an adaptative-passive dynamic vibration absorber composed of a string-mass system equipped with negative stiffness tension adjusting mechanism. **Journal of Sound and Vibration**, v. 332, p. 231-245, 2012.

- ANH, N. D.; et al. Vibration control of an inverted pendulum type structure by passive mass-spring-pendulum dynamic vibration absorber. **Journal of Sound and Vibration**, v. 307, n. 1-2, p. 187-201, 2007.
- BARROS, Murilo Borges. **Proposição, avaliação numérica e experimental de um absorvedor dinâmico de vibrações multimodal**. 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- DIAZ, Yohan Alí Méndez.. **Um Estudo dos Absorvedores Dinâmicos de Vibrações Multimodais**. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- ESEN, Ismail; KOÇ, Mehmet Akif. Optimization of a passive vibration absorber for a barrel using the genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 2, p. 894-905, 2015.
- FERRAGUD, Francesc Xavier B. **Control predictivo basado en modelos mediante técnica de optimización heurística. Aplicación a procesos no lineales y multivariables**. 1999. 334 f. Tese (doutorado) – Polytechnic University of Valencia, Valencia-Spain.
- GALAVOTTI, Thiago Vianna. **Sistemas dinâmicos com amortecedores ativos controlados por atuadores piezelétricos**. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- GHANEM, R. G.; SPANOS, P. D. **Stochastic Finite Elements: a Spectral Approach**. Berlim: Springer-Verlag, 1991.
- HARRIS, Anthony F. **Multi-Degree of Freedom Passive and Active Vibration Absorbers for the Control of Structural Vibration**. 2003. 144 f. Dissertação (mestrado) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- INMAN, Daniel J. **Engineering Vibration**. 4. ed. Pearson Education Inc., 2013.
- JACQUELIN, E.; et al. Polynomial chaos expansion with random and fuzzy variables. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 75, p. 41-56, 2016.
- KESHAVARZZADEH, Vahid; FERNANDEZ, Felipe; TORTORELLI, Daniel A. Topology optimization under uncertainty via non-intrusive polynomial chaos expansion. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 318, p. 120-147, 2017.

- LEE, Chun-Ying; LIN, Jia-Hong. Incorporating piezoelectric energy harvester in tunable vibration absorber for application in multi-modal vibration reduction of a platform structure. **Journal of Sound and Vibration**, v. 389, p. 73-88, 2017.
- LI, Ning; et al. Generalized polynomial chaos for the convection diffusion equation with uncertainty. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 97, p. 289-300, 2016.
- LIU, Linya; SHAO, Wenjie. Design and Dynamic Response Analysis of Rail with Constrained Damped Dynamic Vibration Absorber. **Procedia Engineering**, v. 15, p. 4983-4987, 2011.
- PIMENTEL, Ana Cláudia M. **Simulações sob incertezas em problemas de transferência de calor e massa**. 2014. 124 f. Tese (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SAMANI, Farhad S.; PELLICANO, Francesco. Vibration reduction on beams subjected to moving loads using linear and nonlinear dynamic absorbers. **Journal of Sound and Vibration**, v. 325, n. 4-5, p. 742-754, 2009.
- SHEN, Yujie.; et al. Improved design of dynamic vibration absorber by using the inerter and its application in vehicle suspension. **Journal of Sound and Vibration**, v. 361, p. 148-158, 2016.
- SCHOUTENS, Wim. **Stochastic processes in the Askey scheme**. University of K.U. Leuven, Ghent. 1999.
- VALE, Alan Rafael M. **Controle de vibrações em reatores elétricos através de absorvedores dinâmicos viscoelásticos**. 2006. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- VALENCIA, Luis Augusto Lara. **Controle de Vibrações em Vigas Metálicas com Distintas Configurações de Apoio Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados**. 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

Notas

- 76.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: spinellyh@hotmail.com.
- 77.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: romes@ufg.br.
- 78.** Disponível em: <<http://bit.ly/2QE1NdQ>>. Acesso em: 10 set. 2018.

Estudo da estabilidade global de um edifício em concreto armado considerando base elástica

Luan Rodrigues Silva

Pedro Henrique Pedrosa de Melo

João Pedro Sena

Wellington Andrade da Silva

Resumo: A avaliação da estabilidade global de um elemento objetiva garantir a segurança da estrutura considerando o aumento das deformações causadas por ações verticais e horizontais, estas originadas principalmente pelas ações do vento e não-linearidades estruturais. Quanto maior o índice de esbeltez da estrutura, maior a necessidade da análise dos efeitos de segunda ordem, sendo comum considerar todos os apoios como totalmente rígidos. Porém, a deformabilidade do solo pode ter influência significativa na redistribuição dos esforços, o que caracteriza a vinculação a uma condição de apoios flexíveis. Assim, no presente trabalho utilizou-se o software EBERICK V. 8 para as análises numéricas somado a planilhas de cálculo para os parâmetros de entrada do solo, para que o programa possa fazer o cálculo considerando base elástica. Como resultado, o trabalho comprova que a consideração da deformabilidade do solo gera uma redistribuição de esforços, devendo ser considerada em projetos de edifícios altos e esbeltos.

Palavras-chave: Estabilidade global. Base elástica. ISE.

Introdução

No dimensionamento dos elementos estruturais são determinados os esforços resultantes das ações atuantes com o objetivo de garantir a segurança

do edifício. A análise considerando os esforços oriundos do peso próprio, carregamento, efeitos do vento, não linearidade do material, não linearidade geométrica e demais cargas é chamada de análise de segunda ordem, que ganha uma importância ainda maior com as imposições arquiteturas atuais, com edifícios cada vez mais altos.

Ainda hoje é comum a consideração dos apoios, nas fundações, como totalmente rígidos. No entanto, a deformabilidade do solo tem influência significativa na redistribuição dos esforços, sendo a vinculação entre solo e estrutura que melhor descreve o comportamento de uma edificação é a condição de apoios flexíveis. Era uma simplificação necessária, pois não se tinham ferramentas computacionais e existia uma grande dificuldade em analisar através de métodos analíticos edifícios sobre apoios flexíveis. A escolha pelo modelo indeslocável afasta muito o modelo do que realmente acontece na realidade.

O uso de um modelo mais aprofundado é recomendado para obter um comportamento mais realista da estrutura, considera-se o apoio do pilar na fundação como um apoio elástico (base elástica). Esta é obtida a partir de características de deformabilidade do solo, considerando a contribuição do solo na interação com a estrutura empregando um sistema de molas no apoio. A deformabilidade do solo será estimada com o auxílio da geoestatística, através de método de interpolação de dados extraídos de ensaios de SPT. A determinação correta desses efeitos é bastante complexa, sendo a análise dos esforços feita através de programas específicos que utilizam Análise Matricial.

Devido a sua grande participação no mercado em comparação aos demais métodos utilizados de investigação de subsolo, o ensaio SPT foi utilizado como fonte de amostragem.

Logo, o trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso onde seja possível avaliar e comparar critérios e procedimentos utilizados no

dimensionamento de um edifício. Será determinado um modelo mais realista com intuito de prever como o solo irá se comportar, buscando associar economia de material e segurança. Também é proposto uma comparação detalhada do dimensionamento considerando base rígida, base elástica e base elástica com utilização de geoestatística com interpolação de dados de sondagem.

1. Análise da deformabilidade do solo

O solo pode ser representado numericamente de duas maneiras: por meio de molas (hipótese de Winkler) ou representado como um meio contínuo. Sendo que, prever o comportamento mecânico do solo é uma tarefa complexa devido à heterogeneidade do material, podendo apresentar partícula de argila até matacões. Apesar do solo não ser um material elástico, em análises convencionais limita-se a tensão atuante na base da fundação à tensão admissível do solo. Fixadas essas condições é possível a aplicação do modelo de Winkler. Este modelo de comportamento do solo admite que as pressões de contato são proporcionais ao deslocamento (w) de qualquer ponto situado na superfície do solo quando carregado.

O modelo de Winkler, conforme esquema apresentado na Figura 99, pode ser utilizado tanto para carregamentos verticais (radiers, sapatas e vigas de fundação), quanto para ações horizontais (estacas sob forças horizontais e estruturas de escoramento de escavações).

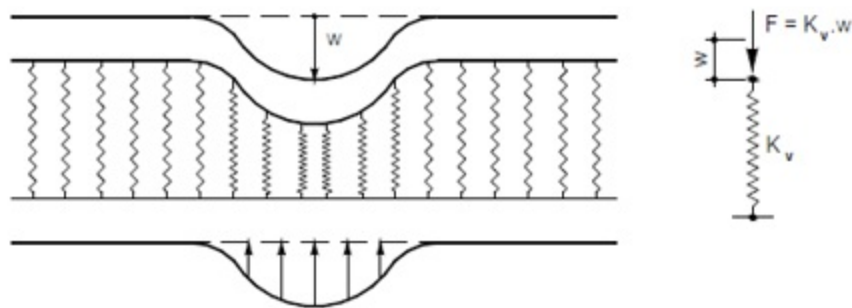


Figura 99. Esquema de cálculo de um radier pela área de influência dos pilares

Fonte: Hachich et al. (2003).

A Equação 1 rege o modelo:

$$F = K_v \cdot w \quad (1)$$

A constante de proporcionalidade K_v é também chamada de coeficiente de reação vertical, módulo de reação ou coeficiente de mola. A mesma pode ser obtida através de ensaio de placa, cálculo do recalque da fundação real ou uso de tabelas de valores típicos. Porém, são necessárias correções de dimensão e forma aos valores do coeficiente de reação obtido por meio do ensaio de placa, pois o valor obtido através do ensaio não é uma propriedade do solo, mas, uma resposta a uma força aplicada por uma dada estrutura. O coeficiente de mola é definido por meio da Equação 2:

$$K_v = \frac{1}{B} \cdot \frac{E_{solo}}{1 - \nu_{solo}^2} \cdot \frac{1}{I_s} \quad (2)$$

Sendo: K_v é o coeficiente de mola, B é a menor dimensão da fundação, ν_{solo} o coeficiente de Poisson do solo, E_{solo} o módulo de elasticidade do solo, I_s o fator de forma da fundação.

O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do solo podem ser obtidos por meio de valores tabelados fornecidos por Bowles (1982). Na Tabela 47 pode se observar os valores de módulos de elasticidade de alguns solos em função do SPT e da resistência de ponta de um tubulão ou estaca. Já na Tabela 48, tem-se o coeficiente de Poisson para alguns tipos de solo.

Tipo de solo	Módulo de deformação do solo (E_{solo})	
	$E_s = f(\text{SPT})$ (kPa)	$E_s = f(R_p)$ (kPa e KN)
Areia	$E_s = 500(\text{SPT} + 15)$	$E_s = 2 \text{ a } 4 R_p$

Areia Argilosa	$E_s=320(\text{SPT}+15)$	$E_s= 3 \text{ a } 6 R_p$
Areia Siltosa	$E_s=300(\text{SPT}+6)$	$E_s= 1 \text{ a } 2 R_p$
Areia/pedregulho	$E_s=1200(\text{SPT}+6)$	-
Argila mole	-	$E_s= 6 \text{ a } 8 R_p$

Tabela 47. Módulo de deformação do solo em função do NSPT E R_p

Fonte: Bowles (1982).

Tipo de solo		Coefficiente de Poisson ν
Argila	Saturada	0,4 - 05
	Não saturada	0,1 - 0,3
	Arenosa	0,2 - 0,3
	Siltosa	0,3 - 0,35
Areia	Densa	0,2 - 0,4
	Fofa*e grossa	0,15
	Fofa*e fina	0,25
Rocha	Variação em função do tipo de rocha	0,1 - 0,4
Nota:(*) índice de vazios compreendido entre 0,4 e 0,7		

Tabela 48. Coeficiente de Poisson para diferentes tipos de solo

Fonte: Bowles (1982).

A Tabela 49 apresenta os coeficientes de forma para sapatas, os quais, poderão ser utilizados para os tubulões. Já na Tabela 50, observa-se alguns exemplos de valores da constante de proporcionalidade.

Forma	Compr. (L)	Sapata flexível			Sapata rígida
	Largura (B)	centro	canto	média	
Circular	-	1,00	0,64	0,85	0,79
	-	1,12	0,56	0,95	0,99
	1,5	1,36	0,67	1,15	1,06

Quadrada	2	1,52	0,76	1,30	1,20
	3	1,78	0,88	1,52	-
	5	2,10	1,05	1,83	1,70
	10	2,53	1,26	2,25	2,10
	100	4,00	2,00	3,70	3,40
	100	5,47	2,75	5,15	-

Tabela 49. Coeficiente de forma

Fonte: Perloff (1960) apud Velloso e Lopes (1996); Bowles (1982).

Tipo de solo	K_v (kgf/cm ³)
Turfa leve - Solo pantanoso	0,5 a 1,0
Turfa pesada - Solo pantanoso	1,0 a 1,5
Areia fina de praia	1,0 a 1,5
Aterro de silte, areia e cascalho	1,0 a 2,0
Argila molhada	2,0 a 3,0
Argila úmida	4,0 a 5,0
Argila seca	6,0 a 8,0
Argila seca endurecida	10,0
Silte compactado com areia e pedra	8,0 a 10,0
Silte compactado com areia e muita pedra	10,0 a 12,0
Cascalho miúdo com areia fina	8,0 a 12,0
Cascalho médio com areia fina	10,0 a 12,0
Cascalho grosso com areia grossa	12,0 a 15,0
Cascalho grosso com pouca areia	15,0 a 20,0
Cascalho grosso com pouca areia compactada	20,0 a 25,0

Tabela 50. Valores K_v (Kgf/cm³)

Fonte: Kalender (1962) apud Alexandre Júnior (2012).

2. Interação solo-estrutura

A interação solo-estrutura é definida como uma influência recíproca gerada entre a superestrutura e o sistema de fundação com o solo, inicia-se na fase de construção e estende-se até que seja obtido um estado de equilíbrio: tensões e deformações, tanto da estrutura como do maciço de solos (Colares, 2006).

Em geral dimensiona-se a estrutura supondo apoios indeslocáveis, resultando num conjunto de cargas, que é passado ao engenheiro geotécnico para que o mesmo faça o dimensionamento das fundações, com isso, não se considera os efeitos da rigidez da estrutura, bem como a sequência e o processo construtivo. Porém, as fundações, devido ao comportamento deformável do solo, solicitam a estrutura com carregamentos diferentes da hipótese de apoios indeslocáveis, alterando assim os esforços atuantes na estrutura.

Um dimensionamento considerando a Interação Solo Estrutura (ISE) busca tornar o modelo estrutural mais realista. À medida que se leva em conta o comportamento da fundação interagindo com a estrutura, ocorre uma redistribuição dos esforços. Com a consideração dessa interação, os recalques passam a depender da rigidez do conjunto solo-estrutura, resultando numa propensão de padronização dos mesmos. Com a redução dos recalques diferenciais, as distorções angulares da edificação são reduzidas, evitando, muitas vezes, o aparecimento de danos por fissuramento.

3. Metodologia

Inicialmente foi dimensionada a estrutura considerando apoios rígidos, para posteriormente substituir pelos coeficientes de mola (base elástica). Para realização da análise computacional dos exemplos propostos neste trabalho, faz-se uso da ferramenta computacional AltoQI EBERICK V. 8. O programa utilizado possibilita a substituição do vínculo apoio rígido por base elástica,

através da substituição do grau de liberdade por um coeficiente de mola do solo.

Incluem-se nos resultados obtidos pelo EBERICK também os efeitos de segunda ordem, combinados com a interação solo-estrutura, com a finalidade de verificar como o edifício irá comportar-se, como serão os esforços no mesmo e a confiabilidade de cada uma das considerações utilizadas para o cálculo do projeto estrutural.

Nos exemplos utilizou-se para o concreto f_{ck} de 25 MPa, agressividade ambiental II, diâmetro de agregado igual a 19 mm e os cobrimentos nominais para os elementos estruturais conforme indicados na NBR 6118 (ABNT, 2014).

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014) item 15.7.3, para a análise dos esforços globais de 2ª ordem, em estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares, pode ser considerada a não linearidade física de maneira aproximada, admitindo-se uma redução da rigidez dos elementos estruturais. Dessa forma, a inércia dos elementos foi calculada considerando a seção fissurada do concreto, aplicando-se uma redução de $0,7E_{ci}I_c$ para vigas, pilares e lajes. Portanto, o modelo estrutural leva em consideração a redução da rigidez, resultando em maiores deslocamentos.

Além disso, para a configuração do método P-Delta no software AltoQI EBERICK, utilizou-se um número de iterações igual a 20 com uma precisão ou tolerância mínima de 0,5% (0,005).

O edifício apresenta uma estrutura convencional formada por vigas, lajes maciças e pilares em concreto armado. O modelo I possui pavimento térreo e mais 12 pavimentos tipo com pé direito de 2,90 m, resultando em uma altura total de 37,70 m. Com intuito de avaliar os efeitos da ISE num edifício mais esbelto reproduziu o mesmo edifício do modelo I, porém com maior altura. O modelo II possui pavimento térreo e mais 20 pavimentos tipo com pé direito de 2,90 m, resultando em uma altura de 60,90 m. A planta baixa dos edifícios

está exemplificada na Figura 100. A arquitetura do edifício utilizado neste trabalho é do trabalho de França (1985 apud Bueno, 2009).

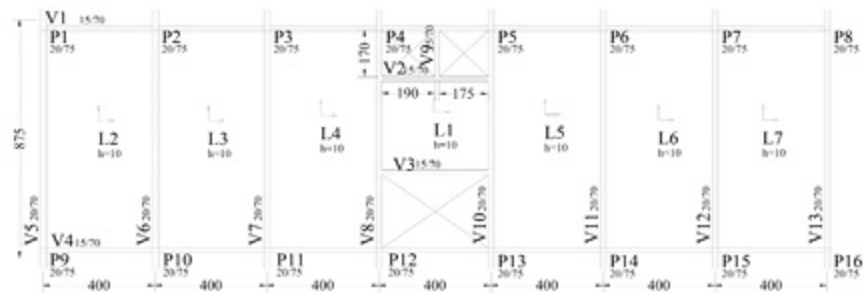


Figura 100. Esquema de cálculo de um radier pela área de influência dos pilares

Fonte: França (1985) apud Bueno (2009).

A ação horizontal considerada foi a do vento conforme NBR 6123. A velocidade básica é de 40 m/s, o fator Topográfico (S1) igual a 1,0 considerando terreno plano ou fracamente acidentado, categoria de rugosidade IV (S2), Classe de edificação B (S2) e fator estatístico (S3) igual a 1,0 (edificações para hotéis e residências) e os respectivos coeficientes de arrasto para cada direção (ABNT, 1998). Os sentidos da aplicação do vento que foram utilizados são a 0°, 90°, 180° e 270°, conforme na Figura 101.

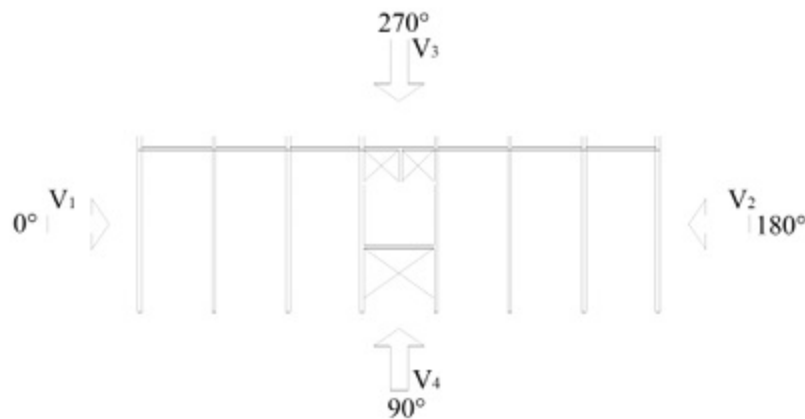


Figura 101. Sentido aplicação do vento na estrutura

Fonte: Bueno (2009).

Cada modelo proposto foi processado considerando três condições de apoio diferente, sendo elas: (1) Base rígida onde o solo é tido como indeformável e não se considera a interação solo-estrutura; (2) base elástica personalizada onde se considera a ISE e é feita uma regionalização do solo, as características do solo são determinadas conforme a locação da sondagem (Furo I, II e III) como apresentado na Tabela 51; (3) base elástica padrão também considera a ISE, porém as características do solo são determinadas com base no valor mais baixo da sondagem (valores destacados na Tabela 51).

Camada	Prof. L (m)	NSPT			Classificação do Solo
		Furo I	Furo II	Furo III	
1	1	1	2	2	Camada superficial orgânica
2	2	2	2	2	Argila Arenosa, Pouco Siltosa, Úmida, Muito Mole
3	3	7	3	3	
4	4	5	4	8	Areia pouco compacta, Pouco Argilosa
5	5	5	5	9	
6	6	8	8	9	
7	7	8	13	14	
8	8	10	15	17	Areia média, Pouco Argilosa, Úmida, Medianamente Compacta
9	9	12	12	12	
10	10	15	17	15	
11	11	13	15	13	
12	12	11	13	14	
13	13	15	18	15	
14	14	15	28	15	Silte Pedregulhoso, Cor Roxa, Úmido, Duro
15	15	28	30	28	
16	16	32	32	32	
17	17	48	48	48	

Tabela 51. SPT furo de sondagem I, II e III

Fonte: Próprio autor.

Os carregamentos verticais totais do edifício em valores característicos, obtidos pela ferramenta computacional estão apresentados na Tabela 52 e as dimensões da fundação apresentada na Tabela 53.

Ações	Edifício de 12 pa	Edifício de 20 pav.
Permanente (kN)	20765,0	22839,1
Sobrecarga (kN)	3724,0	17509,5
Total (kN)	24489,0	40348,5

Tabela 52. Carregamento total do edifício

Fonte: Próprio autor.

Tubulão	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SPT	III	III	II	II	II	II	I	I
Ø Base (m)	2,50	2,65	2,70	2,65	2,65	2,70	2,65	2,50
Tubulão	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
SPT	III	III	II	II	II	II	I	I
Ø Base (m)	2,50	2,65	2,70	2,60	2,60	2,70	2,65	2,50

Tabela 53. Dados de projetos dos tubulões

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros geotécnicos do solo calculados estão apresentados na Tabela 54. Foram obtidos com auxílio do banco de dados do software GEO5, a pressão admissível calcula-se por métodos empíricos e semi-empíricos de Aoki & Velosso (1975) e Décourt & Quaresma (1978).

Pressão admissível	4,28 kfg/cm²

Densidade	18,0 kN/m ³
Ângulo de atrito interno	30°
Coesão do Solo	0,5 kgf/cm ²

Tabela 54. Parâmetros do Solo - Areia Siltosa

Fonte: Próprio autor.

Para se modelar a estrutura com mais fidelidade, faz-se uma simulação da interação solo-estrutura nos modelos estruturais, empregando-se molas para representar a deformabilidade do solo. Com base na hipótese de Winkler calcularam-se os coeficientes de mola para o modelo Elástico Padrão e Elástico Personalizado, como apresentado na Tabela 55.

Tubulão	Elástico Padrão			Elástico Personalizado		
	Kz (tf/m)	Kx (tf/m)	Ky (tf/m)	Kz (Kgf/m)	Kx (Kgf/m)	Ky (tf/m)
P1-1	8765621,8	2629686,5	2629686,5	14901557,0	4470467,1	4470467,1
P2-1	9291559,1	2787467,7	2787467,7	15795650,5	4738695,1	4738695,1
P3-1	9466871,5	2840061,5	2840061,5	14200307,3	4260092,2	4260092,2
P4-1	9291559,1	2787467,7	2787467,7	13937338,6	4181201,6	4181201,6
P5-1	9291559,1	2787467,7	2787467,7	13937338,6	4181201,6	4181201,6
P6-1	9466871,5	2840061,5	2840061,5	14200307,3	4260092,2	4260092,2
P7-1	9291559,1	2787467,7	2787467,7	9291559,1	2787467,7	2787467,7
P8-1	8765621,8	2629686,5	2629686,5	8765621,8	2629686,5	2629686,5
P9-1	8765621,8	2629686,5	2629686,5	14901557,0	4470467,1	4470467,1
P10-1	9291559,1	2787467,7	2787467,7	15795650,5	4738695,1	4738695,1
P11-1	9466871,5	2840061,5	2840061,5	14200307,3	4260092,2	4260092,2
P12-1	9116246,7	2734874,0	2734874,0	13674370,0	4102311,0	4102311,0
P13-1	9116246,7	2734874,0	2734874,0	13674370,0	4102311,0	4102311,0
P14-1	9466871,5	2840061,5	2840061,5	14200307,3	4260092,2	4260092,2
P15-1	9291559,1	2787467,7	2787467,7	9291559,1	2787467,7	2787467,7
P16-1	8765621,8	2629686,5	2629686,5	8765621,8	2629686,5	2629686,5

Tabela 55. Coeficiente de Mola

Fonte: Próprio autor.

4. Discussão e resultados

Os valores dos deslocamentos horizontais no topo do edifício para as 3 condições de apoio, nas duas direções, obtidos pelo ALTO QI EBERICK estão apresentados na Tabela 56. A partir dos valores apresentados, pode ser verificado que quando considerado a ISE, os valores dos deslocamentos na direção y mostram ser 30% (personalizada) e 40% (padrão) maiores para o modelo de 12 pavimentos e cerca de 43% (personalizada) e 60% (padrão) maiores no modelo de 20 pavimentos, em comparação com a consideração da base rígida. Nos deslocamentos na direção de x pode ser verificado que o maior aumento dos deslocamentos foi cerca de 13% para o edifício de 20 pavimentos e 8% de 12 pavimentos, isso ocorre pelo fato da estrutura ser mais rígida na direção desse eixo.

Base rígida		Base elástica personalizada	Base elástica padrão		
	Direção	Deslocamento [cm]	Deslocamento [cm]	Deslocamento [cm]	Limite [cm]
12 pav.	X	1,18	1,27	1,28	2,22
	Y	1,67	2,17	2,36	2,22
20 pav.	X	4,8	5,28	5,46	3,59
	Y	9,57	13,69	15,34	3,59

Tabela 56. Deslocamento horizontal

Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados do momento de segunda ordem, de acordo com a Tabela 57, observa-se um aumento dos valores dos momentos, quando considerado ISE, em consequência dos maiores deslocamentos no topo do

edifício. No modelo de 12 pavimentos, na direção x, ocorreu um aumento de 39% quando considerado base elástica personalizada e de 6% quando considerado base elástica padrão. Na direção y, ocorreu um aumento de 22% (personalizada) e de 30% (padrão). Para o modelo de 20 pavimentos os deslocamentos foram proporcionalmente superiores, por ser tratar de um edifício mais esbelto.

	Direção	Base Rígida (tf.m)	Base elástica personalizada (tf.m)	Base elástica padrão (tf.m)
12 pav.	X	68,77	95,58	72,87
	Y	100,94	123,34	132,09
20 pav.	X	395,53	521,74	426,89
	Y	835,16	1091,83	1189,14

Tabela 57. Momento de segunda ordem de cálculo

Fonte: Próprio autor.

Os resultados do parâmetro de estabilidade global, o coeficiente Gama Z que avalia a sensibilidade da estrutura aos efeitos de segunda ordem, podem ser observados na Tabela 58. O maior resultado para o parâmetro Gama Z foi na direção de x, isso se deve ao fato que na direção y o edifício é composto de oito pórticos com elevada rigidez que são encarregados de contra-ventar a estrutura, já na direção de x tem somente dois pórticos, resultando a uma menor rigidez em x. A utilização de um núcleo rígido poderia ser eficiente neste caso.

	Direção	Base Rígida	Base elástica personalizada	Base elástica padrão	Limite
12 pav.	X	1,17	1,25	1,18	1,10
	Y	1,08	1,09	1,10	1,10
	X	1,31	1,46	1,35	1.10

P1	0,93%	8,65%	0,00%	2,43%	5,31%	3,23%	3,38%	14,42%	3,23%
P2	0,39%	9,43%	3,13%	-2,91%	4,31%	0,00%	-2,53%	14,15%	3,13%
P3	-2,64%	8,41%	3,13%	2,05%	5,17%	0,00%	-0,65%	14,02%	3,13%
P4	0,51%	9,43%	6,25%	0,34%	4,31%	-2,94%	0,85%	14,15%	3,13%
P5	1,98%	10,38%	3,13%	-1,22%	3,42%	0,00%	0,74%	14,15%	3,13%
P6	7,45%	11,21%	3,13%	-7,68%	2,52%	-3,03%	-0,81%	14,02%	0,00%
P7	-9,85%	10,28%	0,00%	5,61%	3,39%	3,13%	-2,09%	14,02%	3,13%
P8	2,45%	12,38%	6,45%	0,65%	1,69%	-3,03%	3,11%	14,29%	3,23%
P9	0,73%	8,65%	0,00%	2,17%	6,19%	3,23%	2,91%	15,38%	3,23%
P10	0,17%	9,43%	3,13%	-2,53%	5,17%	0,00%	-2,37%	15,09%	3,13%
P11	-2,66%	9,43%	6,25%	1,90%	5,17%	-5,88%	-0,82%	15,09%	0,00%
P12	0,88%	10,48%	6,25%	0,47%	4,31%	-2,94%	1,36%	15,24%	3,13%
P13	2,47%	11,43%	3,13%	-1,09%	3,42%	0,00%	1,36%	15,24%	3,13%
P14	7,50%	12,26%	3,13%	-5,74%	2,52%	-3,03%	-0,82%	15,09%	0,00%
P15	-10,02%	12,26%	0,00%	5,50%	5,88%	3,13%	-2,37%	18,87%	3,13%
P16	2,38%	13,46%	6,45%	0,52%	1,69%	-3,03%	2,91%	15,38%	3,23%

Tabela 59. Comparação entre os esforços do edifício de 12 pavimentos

Fonte: Próprio autor.

Confrontando a condição de apoio base elástica padrão, onde é utilizado o menor valor de resistência do solo, para toda a estrutura, com a condição base rígida sem interação solo estrutura, como mostrado na Tabela 59, observa-se acréscimo de momento ainda maior, chegando a 18,87% no pilar P15. No entanto, os acréscimos dos momentos ocorrem de maneira regular, o que pode ser explicado pelo fato dos recalques, nessa condição, serem mais uniformes, gerando menos deslocamentos no topo do edifício. Comparando a condição de apoio base elástica padrão com a base elástica personalizada, verifica-se que as diferenças de esforços são pequenas, as maiores variações entre as duas considerações são da ordem de 6%.

A redistribuição dos esforços no edifício com 20 pavimentos ocorre de maneira semelhante ao modelo com 12 pavimentos, porém devido ao índice

de esbeltez elevado, ocorrem maiores deslocamentos no topo do edifício e consequentemente, a redistribuição dos esforços quando considerada a ISE são ainda mais significativos.

Comparando o modelo base elástica personalizada com base rígida no edifício com 20 pavimentos, contrapondo os esforços entre os modelos elástico padrão e elástico personalizado (Tabela 60), nota-se que existem maiores esforços do que quando analisado para o modelo de 12 pavimentos. Um dos fatores que certamente influenciam nessa diferença, é que no edifício mais alto os carregamentos são maiores. Além disso no modelo elástico padrão admite-se o solo de todas as fundações com a menor resistência dentre as sondagens, portanto irá ocorrer maiores deslocamentos e consequentemente irá amplificar os feitos de segunda ordem.

[illegible]

P14	9,20%	31,60%	4,11%	-6,80%	6,90%	0,00%	4,11%	40,60%	1,80%
P15	-7,30%	32,70%	1,35%	9,00%	5,80%	1,33%	2,70%	40,40%	1,00%
P16	-0,20%	35,70%	2,74%	3,00%	4,80%	0,00%	2,74%	42,20%	2,70%

Tabela 60. Comparação entre os esforços do edifício de 20 pavimentos

Fonte: Próprio autor.

Constata-se elevado aumento nos esforços de momento, para o edifício de 20 pavimentos, confrontando a condição de apoio base elástica personalizada e base rígida (Tabela 58). Nos pilares P8 e P16 os esforços aumentaram cerca de 35,7% para momento em x, sendo que redistribuição de esforços não ocorre de maneira uniforme. Já confrontando com condição de base rígida, observou-se redistribuição de esforços semelhante ao edifício com 12 pavimentos, onde ocorreu aumento significativo dos esforços de momento em x, sendo que a maior valor ocorreu no pilar P16 42,2% em relação ao modelo com base rígida. As alterações nos esforços ocorreram de maneira uniforme.

Considerações finais

A partir das avaliações realizadas no presente trabalho, percebe-se o quanto a consideração da interação solo-estrutura influencia na estabilidade global e é importante para o dimensionamento da estrutura. A pesquisa comprova o que foi estudado na teoria: a consideração da deformabilidade do solo nos projetos estruturais, buscando um modelo mais realístico, gera uma redistribuição nos esforços ao longo de sua estrutura.

Essa redistribuição pode originar alterações significativas no dimensionamento dos elementos estruturais, considerando-se que nas modelagens propostas pode se observar alterações significativas dos esforços, principalmente de momento. Ainda que não resultem em economia, estas

redistribuições continuam sendo válidas no item segurança, fator esse de maior importância sobre os demais.

Outro fato importante é que a não consideração da ISE minimiza valores de recalques diferenciais, que na prática vão ocorrer na estrutura, podendo causar diversas patologias. Logo, a consideração da interação solo-estrutura é de extrema importância no dimensionamento estrutural de edifícios, principalmente em edifícios esbeltos. Trata-se de um modelo incomparavelmente mais realista do que a consideração base rígida.

Referências

- ALTOQI EBERICK. **Versão V8 Gold**. Tecnologia aplicada à engenharia S/A. [s.i.] 2013.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING (PCSMFE), 5., Buenos Aires, 1975. **Proceedings...** Buenos Aires, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BOWLES, Joseph E. **Foundation Analysis and Design**. McGraw-Hill. 3. ed. Nova York: McGraw Hill, 1982.
- BUENO, Mônica Maria E. **Avaliação dos parâmetros de instabilidade global em estruturas de concreto armado**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.
- COLARES, George Moura. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DECOURT, L; QUARESMA, A. R. **Capacidade de carga de Estacas a partir de Valores de SPT**. Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, v. 1, p. 45-53, 1978.
- HACHICH, Waldemar; FALCONI, Frederico F.; SAES, José Luiz; et al. **Fundações: Teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2003.

LONGO, Luis Felipe. **Como determinar o coeficiente de recalque horizontal?** São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://bit.ly/2Nn0m5z>>. Acesso em: 10 set. 2018.

VELLOSO, Dirceu A.; LOPES, Francisco R. **Fundações**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 1996.

Otimização de vigas de concreto armado pelo método gradiente reduzido generalizado e algoritmo genético

Heitor Maciel Lima⁷⁹

Nathan Alecrim Laranjeira⁸⁰

Wanderlei Malaquias Pereira Junior⁸¹

Robson Lopes Pereira⁸²

Resumo: Há uma constante necessidade de melhoramento das ferramentas usadas para resolução de todas as gamas de problemas na engenharia, e para esse fim, o objetivo do trabalho é da otimização de vigas submetidas à flexão com o emprego do Algoritmo Genético (AG) e o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e comparação da eficiência de cada método. Para realizar a comparação entre os métodos, foram definidas várias condições onde ambo deveriam otimizar seções transversais de vigas de concreto armado, encontrando assim uma solução ótima para o problema do custo da viga, levando em conta todos os recursos necessários para construir tal elemento estrutural. Ambos os métodos obtiveram sucesso em todos os cenários testados, com mínimas discrepâncias entre si.

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Otimização, Concreto, Gradiente Reduzido Generalizado.

Introdução

A otimização é de suma importância para qualquer tipo de desenvolvimento, processos mais eficientes são a chave para melhores resultados finais. A utilização de recursos de forma consciente é primordial para a continuidade do crescimento da sociedade em um cenário onde cada

recurso deve ser alocado da melhor maneira possível afim de mitigar perdas e evitar desperdícios. O setor da construção civil não está isento dessa necessidade de se aprimorar, em especial no segmento de obras moldadas em loco, toda via é possível a concepção de projetos estruturais otimizados em relação ao custo, inclusive tendo assim uma melhor margem de lucro sobre o investimento da construção.

O trabalho direciona-se à aplicação e comparação de dois métodos de otimização, no contexto do dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado, o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o Algoritmo Genético (AG). Para o desenvolvimento do código foram usados os softwares Maple® 18 e Microsoft Excel® com sua extensão chamada solver. Tais programação foi baseada no trabalho desenvolvido por Maia (2009) onde o autor demonstra a aplicabilidade da ferramenta solver como opção à otimização de estruturas de concreto armado.

O trabalho baseia-se nas disposições de cálculo e dimensionamento de vigas submetidas a flexão de acordo com as indicações e disposições da NBR 6118 (ABNT, 2014) e das disposições de da NBR 8681 (ABNT, 2003).

A partir das diretrizes normativas o processo de cálculo e equacionamento do problema segue o modelo disposto em Carvalho e Figueiredo Filho (2014) e Giongo (2007).

Logo o objetivo do trabalho é simular vigas biapoiadas submetidas a flexão verificando quais as dimensões ótimas (Altura e Largura) dessa peça.

O trabalho se justifica pelo fato de que o uso de técnicas matemáticas avançadas que possam reduzir o custo de projetos é essencial do ponto de vista financeiro para empresas que tem como foco a elaboração de projetos de engenharia.

1. Desenvolvimento

Nessa seção será apresentado todo o referencial teórico que foi necessário para desenvolvimento desse trabalho em questão.

1.1 Algoritmos Genéticos (AG)

Conforme Mitchell (1999), a criação dos algoritmos genéticos, ou evolucionários, é atribuída ao professor da Universidade Michigan, John Henry Holland, na década de 1960. A intenção de Holland em seu estudo era criar meios de importar e adaptar os mecanismos de seleção natural para os sistemas computacionais.

Atualmente os algoritmos genéticos são ferramentas desenvolvidas, e destacam-se pela sua utilidade e versatilidade como ferramenta de otimização. Ainda segundo Mitchell (1999) os algoritmos genéticos são excelentes ferramentas de busca em problemas computacionais com enormes números de possibilidades, a exemplo da previsão de um conjunto de regras que descrevam o comportamento de altos e baixos em um determinado sistema econômico.

A programação em AG divide-se em formas de representação do problema dentro do cromossomo, sendo as mais comuns: binária, números reais, permutação de símbolos e símbolos repetidos. A representação binária é simples, fácil de manipular cromossomas através dos operadores genéticos, fácil de ser transformada em inteiro ou real e, ainda, facilita a prova de alguns teoremas (Pacheco, 1999, p. 2).

A Figura 102 exemplifica, através de um fluxograma simplificado, o processo da otimização utilizando AG.

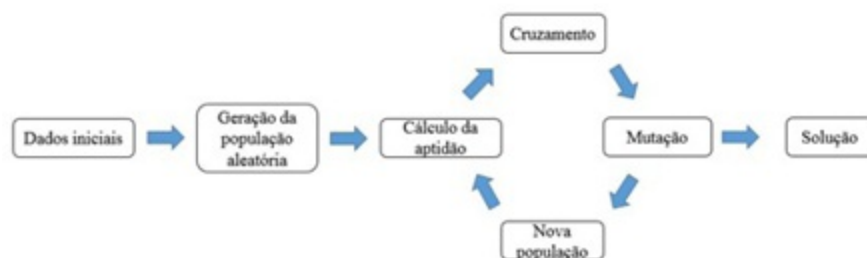


Figura 102. Fluxograma do algoritmo genético

Fonte: Próprio autor, 2017.

A população de um algoritmo genético é o conjunto de indivíduos que estão sendo cogitados como solução e que serão usados para criar o novo conjunto de indivíduos para análise. O tamanho da população pode afetar o desempenho global e a eficiência dos algoritmos genéticos. A população representa o espaço de busca das variáveis de projeto, que serão denominadas como indivíduos no problema de AG. No caso desse trabalho o processo de cálculo da aptidão é baseado na avaliação da população perante a função objetivo, medindo assim o quão bom é aquele indivíduo perante as condições do problema. O presente trabalho é baseado nas considerações feitas por Eshelman *et al.* (1989) e Davis (1991) que resulta na Equação 1, dada logo abaixo:

$$H = \frac{1}{FO(x_1, x_2, \dots, x_n)} \quad (1)$$

Onde

H – Aptidão;

FO – Valor da função objetivo para determinado indivíduo.

As Novas gerações são determinadas basicamente por dois processos básicos, são eles: (a) Cruzamento; (b) Mutação. No caso desse trabalho o processo para criar novas gerações é caracterizado pelas etapas de cruzamento (em inglês: crossover) e mutação que permitem que os pais sejam combinados e assim criando novos filhos. Esses novos filhos são o resultado final do processo iterativo do AG.

O cruzamento escolhido para essa pesquisa foi o Blend Crossover ou BLX α . Eshelman *et al.* (1997) que propõe que os pais dos indivíduos que realizarão o cruzamento sejam aleatoriamente escolhidos na população, valendo a ressalva de que se o mesmo indivíduo é selecionado duas vezes a busca deve ser refeita.

A determinação da ocorrência cruzamento é determinada com base na taxa de cruzamento, se haverá ou não cruzamento, caso não haja, o pai com maior aptidão se torna o filho que seria o resultado da operação, caso haja cruzamento, o mesmo é definido pela Equação 2.

$$F1a = \beta \cdot (P1a - P2a) + P1a \quad (2)$$

Onde:

β – Operador do cruzamento, número real que varia aleatoriamente entre 1,5 e 1,5;

F1a – Característica “a” da geração do filho 1;

P1a – Característica “a” do pai 1; P2a - Característica “a” do pai 2.

No caso da mutação foi utilizada a proposta de Davis (1991) chamada de mutação *creep*, caracterizada por uma ligeira alteração nas características dos filhos de um cruzamento aleatório, essa operação é definida de acordo com a equação 3. Esta mutação é considerada uma mutação não destrutiva, visto que a alteração que promove nos indivíduos é pequena, isso permite que a taxa de sua ocorrência possa ser maior que as de outras mutações, as quais são geralmente em torno de 3% a 8%, podendo chegar a 40% sem prejuízo à eficiência do método.

$$F1a = \lambda \cdot F1a \quad (3)$$

Onde:

F1a – Característica “a” do filho1.

λ – Operador de mutação. Valor variando aleatoriamente entre 0,95 e 1,05.

1.2 Método do Gradiente Reduzido Generalizado

O método do GRG pertence à classe dos métodos determinísticos de otimização, porém trata-se de um método direto de otimização. Segundo Martinez e Santos (1998) a ideia fundamental é enxergar o problema original,

pelo menos localmente, como um problema irrestrito num espaço de dimensão menor, enquanto os métodos determinísticos indiretos contabilizam as restrições dentro de uma função pseudo-objetivo adaptada, sendo inicialmente proposto por P. Wolfe em 1963. Maiores detalhes sobre a formulação desse método podem ser encontrados no texto de Sacoman (2012).

2. Materiais e métodos

Serão apresentados neste item os materiais e métodos que foram empregados na confecção dos resultados desse artigo.

O artigo aqui apresentado é classificado como uma pesquisa exploratória e aplicada, pois se utiliza de dados numéricos para fazer as análises do custo de uma estrutura de viga real explorando a temática de otimização em projetos estruturais., obtidas através de uma ferramenta numérica desenvolvida com linguagem matemática para descrever a situação de otimização de uma viga de concreto armado.

No caso desse trabalho foram desenvolvidas duas rotinas computacionais de otimização (uma de AG e outra em GRG) para aplicação do problema da engenharia que será apresentado logo a seguir.

2.1 Procedimento de modelagem

O problema analisado se trata do dimensionamento à flexão simples de uma viga de concreto armado, em seção retangular e apoiada submetida a um carregamento distribuído constante ao longo do vão, conforme Figura 103.

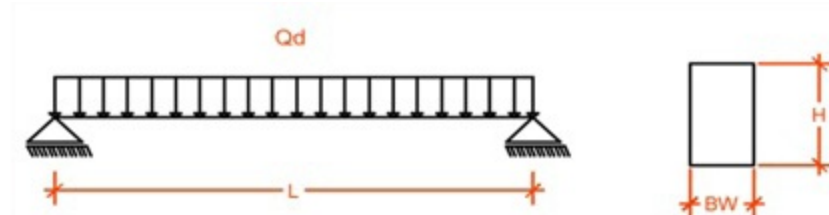


Figura 103. Modelo estrutural e seção transversal

Fonte: Próprio autor, 2017.

Para realização dos testes numéricos, formulou-se um problema de minimização de custo com restrições baseadas no dimensionamento à flexão simples de seções retangulares de concreto armado, conforme os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2014).

A FO é dada através do somatório dos custos dos materiais constituintes da viga:

- a) Custo de forma (CF);
- b) Custo de concreto (CC);
- c) Custo de aço (CA).

Para maior esclarecimento a seguir apresenta-se a FO completa do problema (Ver Equação 4).

$$Ct = Cc + Cf + Cs \quad (4)$$

Onde:

Ct – Custo total da peça de concreto armado (R\$);

Cs – Custo do aço para construção civil (R\$);

Cf – Custo das formas para concreto armado (R\$).

Cc – Custo do concreto usinado (R\$).

De maneira a detalhar cada parcela da função, seguem as expansões algébricas de cada termo da FO. A Equação 5 referente ao custo do aço.

$$Cs = Cca50 \cdot \gamma_s \cdot [Asp \cdot (L + (h - 5) \cdot 2)] \quad (5)$$

Onde:

$Cca50$ – Custo unitário do aço CA50 (R\$/kg) cortado, dobrado e montado na obra;

Asp – Armadura positiva (cm²);

γ_s – Peso específico do aço (kg/cm³);

L – Comprimento total da viga (cm);

h – Altura da seção transversal da viga (cm).

Custo de forma é dado pela Equação 6:

$$Cf = (2 \cdot h + bw) \cdot L \cdot Cfor \quad (6)$$

Onde:

h – Altura da seção transversal da viga (cm)

bw – Largura da seção transversal da viga (cm)

$Cfor$ – Custo unitário de forma (R\$/cm²).

O custo de concreto para a viga é dado pela Equação 7 apresentada a seguir:

$$Cc = h \cdot bw \cdot L \cdot Cconc \quad (7)$$

Onde:

$Cconc$ – Custo unitário do concreto (R\$/cm³).

Como o modelo baseou-se em um dimensionamento a flexão utilizando armadura simples as restrições laterais são especificadas logo a seguir pelas Equações 8 a 10.

$$12 \text{ cm} < bw < 50 \text{ cm} \quad (8)$$

$$dmin + 4 \text{ cm} < h < 70 \text{ cm} \quad (9)$$

$$Kx > 0,45 \quad (10)$$

Onde $dmin$ é dado pela Equação 11.

$$dmin = \sqrt{\frac{Md}{0,32 \cdot bw \cdot fcd}} \quad (11)$$

Onde:

bw – Largura da seção transversal (m);

Md – Momento majorado de cálculo (kN.m);

fcd – Resistência de cálculo do concreto (kN/m²);

h – Altura da seção transversal (m);

Kx – Relação entre a altura útil e a posição da linha neutra na viga.

No caso o valor de K_x se restringe a um valor menor que 0,45 para garantir que a peça dimensionada tenha sua ductilidade garantida.

Para definição dos valores dos materiais foi utilizada a base de dados do SINAPI/CAIXA Novembro/2016, desonerado conforme a Tabela 61, apresentado logo abaixo:

Material	Unidade de medida	Preço (R\$)
Custo da chapa de madeira para forma (PCM)	m ²	31,93
Custo do Concreto usinado (PCV)	m ³	296,22
Custo do Vergalhão de aço CA-50 (PA)	kg	4,44

Tabela 61. Valor dos materiais utilizados na definição da FO

Fonte: Próprio autor, 2017.

Os dados de entrada do problema são descritos na Tabela 62 e a tolerância admitida para todos os casos é de 10^{-4} recomendada por Klein (2008).

Simulações	fck (MPa)	fyk (MPa)	bw (cm)	Carga (kN/m)	L (cm)	x1 inicial (cm)	x2 inicial (cm ²)
S1	25,00	500,00	14,00	2, 5, 10, 15 e 20	400,00	45,00	0,70
S2	25,00	500,00	14,00	2, 5, 10, 15 e 20	450,00	45,00	0,70
S3	25,00	500,00	14,00	2, 5, 10, 15 e 20	500,00	45,00	0,70
S4	25,00	500,00	14,00	2, 5, 10, 15 e 20	550,00	45,00	0,70

Tabela 62. Dados de entrada do problema

Fonte: Próprio autor, 2017.

Como dito anteriormente para obtenção dos valores ótimos da variável de projeto foi utilizado-se o método do GRG e o AG. Para o GRG foi

desenvolvida a mesma rotina computacional proposta em Maia (2009) e para o AG desenvolveuse uma rotina conforme o fluxograma descrito na Figura 104.

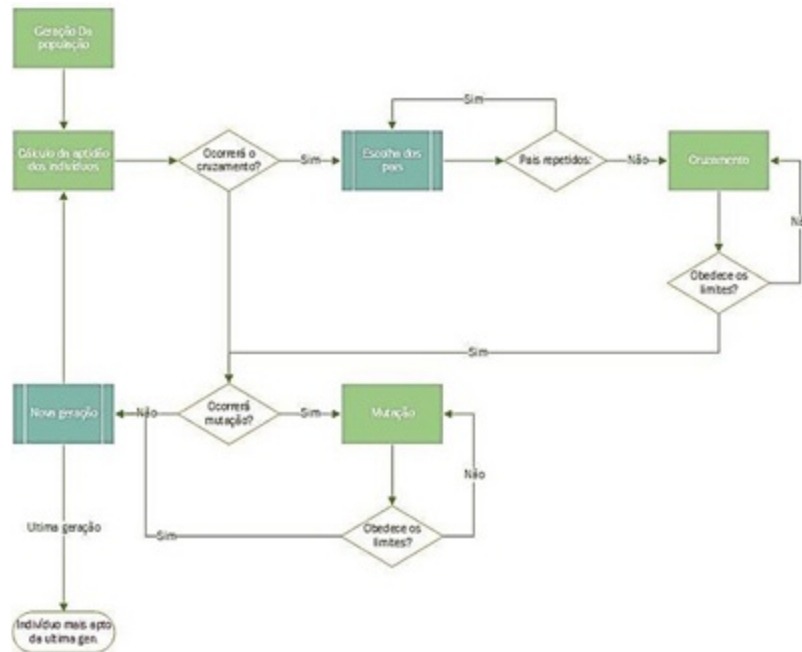


Figura 104. Disposição longitudinal das armaduras

Fonte: Próprio autor, 2017.

Todo o código foi desenvolvido na linguagem Maple 18 e seus aspectos teóricos são os mesmos propostos no referencial teórico desse trabalho.

2.2 Processo de análise

Nesse trabalho o processo de análise consistiu em comparar os resultados obtidos do dimensionamento utilizando um processo bio-inspirado e o processo determinístico. Com a observação que de que para o processo de AG foram realizadas três simulações para se obter o resultado médio e então comparar com os resultados produzidos pelo GRG.

3. Discussão e resultados

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos após as simulações. A Tabela 63 apresenta os resultados obtidos para a simulação que considera o vão da viga com 400,00 cm.

Simulação	h(cm)	bw (cm)	Área de aço (cm ²)	Custo total (R\$)	Custo forma (R\$)	Custo concreto (R\$)	Custo aço (R\$)	Desvio AG
S1-2kN-AG	13,834	15,032	1,134	62,669	12,622	23,416	26,630	0,129%
S1-2kN-GRG	13,213	15,000	1,194	62,517	12,246	22,317	27,954	NA
S1-5kN-AG	21,056	15,045	1,872	98,027	16,896	35,670	45,462	0,063%
S1-5kN-GRG	20,993	15,000	1,884	97,902	16,810	35,356	45,736	NA
S1-10kN-AG	29,321	15,051	2,698	139,462	21,780	49,649	68,032	0,114%
S1-10kN-GRG	29,669	15,000	2,658	139,214	21,974	50,111	67,129	NA
S1-15kN-AG	36,636	15,007	3,230	172,076	26,092	61,897	84,088	0,056%
S1-15kN-GRG	36,397	15,000	3,249	171,945	25,952	61,475	84,518	NA
S1-20kN-AG	42,617	15,032	3,693	200,409	29,639	72,132	98,638	0,033%
S1-20kN-GRG	42,084	15,000	3,746	200,234	29,316	71,085	99,833	NA

Tabela 63. Simulação s1 para o vão de 400 cm

Fonte: Próprio autor.

É possível observar que os desvios estatísticos dos resultados retirados pelo AG sempre estão abaixo de 1% garantindo assim que o algoritmo foi eficiente no sentido da assertividade do resultado ótimo.

Sobre os algoritmos otimizadores é possível perceber que para esse caso de vão L=400 cm o GRG foi ligeiramente superior aos resultados obtidos pelo AG, sendo que a diferença relativa de custo total não superou o valor de R\$ 0,50. Do ponto de vista do dimensionamento a flexão é possível perceber que a variável mais afetada pelo processo foi a altura da viga, fato o qual era esperado no processo.

A Tabela 64 apresenta os resultados do vão L = 450 cm.

Simulação	h(cm)	bw (cm)	Área de aço (cm²)	Custo total (R\$)	Custo forma (R\$)	Custo concreto (R\$)	Custo aço (R\$)	Desvio AG
S2-2kN- AG	15,024	15,057	1,330	78,774	15,00	28653	35,122	0,168%
S2-2kN- GRG	14,882	15,000	1,342	78,594	14,886	28,278	35,430	NA
S2-5kN- AG	23,742	15,020	2,101	123,533	20,785	45,172	57,575	0,093%
S2-5kN- GRG	23,577	15,000	2,117	123,432	20,669	44,799	57,964	NA
S2-10kN- AG	34,125	15,019	2,918	175,955	27,691	64,922	83,342	0,059%
S2-10kN- GRG	33,415	15,000	2,986	175,779	27,213	63,493	85,073	NA
S2-15kN- AG	41,499	15,008	3,601	217,346	32,592	78,895	105,859	0,004%
S2-15kN- GRG	40,993	15,000	3,651	217,251	32,253	77,893	107,106	NA
S2-20kN- AG	46,643	15,005	4,287	253,171	36,012	88,655	128,504	0,007%
S2-20kN- GRG	47,401	15,000	4,209	253,093	36,515	90,068	126,511	NA

Tabela 64. Simulação s2 para o vão de 450 cm

Fonte: Próprio autor.

Como dito na simulação anterior os resultados do AG não apresentaram grande desvio estatístico na obtenção dos seus valores médios e sobre a diferença entre os dois métodos o custo total relativo não superou uma diferença de R\$ 0,50.

Comparando a simulação s2 com a simulação s1 é possível verificar que para as vigas com 2 kN e 5 kN os valores otimizados foram similares sendo que o custo total teve um acréscimo de cerca de R\$ 16,00. A altura nesse caso também foi a variável que mais sofreu alterações com o processo de otimização.

A Tabela 65 e 66 apresentam os resultados dos vãos $L = 500$ cm e $L = 550$ cm respectivamente.

Simulação	h(cm)	bw (cm)	Área de aço (cm ²)	Custo total (R\$)	Custo forma (R\$)	Custo concreto (R\$)	Custo aço (R\$)	Desvio AG
S2-2kN- AG	16,525	15,020	1,493	96,575	17,762	34,935	43,878	0,030%
S2-2kN- GRG	16,551	15,000	1,489	96,507	17,774	34,943	43,791	NA
S2-5kN- AG	25,787	15,048	2,395	152,126	24,617	54,616	72,892	0,092%
S2-5kN- GRG	26,220	15,000	2,350	151,916	24,919	55,357	71,640	NA
S2-10kN- AG	37,284	15,019	3,302	216,706	33,103	49,649	104,787	0,039%
S2-10kN- GRG	37,162	15,000	3,315	216,603	33,005	50,111	105,140	NA
S2-15kN- AG	45,948	15,020	4,017	268,006	39,506	61,897	131,363	0,031%
S2-15kN- GRG	45,589	15,000	4,052	267,849	39,233	61,475	132,365	NA
S2-20kN- AG	54,088	15,015	4,544	312,575	45,519	72,132	152,747	0,196%

S2-20kN-GRG	52,715	15,000	4,672	312,137	44,499	111,295	156,343	NA

Tabela 65. Simulação s2 para o vão de 500 cm

Fonte: Próprio autor.

Simulação	h(cm)	bw (cm)	Área de aço (cm²)	Custo total (R\$)	Custo forma (R\$)	Custo concreto (R\$)	Custo aço (R\$)	Desvio AG
S1-2kN-AG	18,520	15,174	1,613	117,057	21,223	43,543	52,291	0,972%
S1-2kN-GRG	18,220	15,000	1,637	116,256	20,907	42,313	53,036	NA
S1-5kN-AG	28,931	15,013	2,576	183,425	29,620	67,245	86,560	0,011%
S1-5kN-GRG	28,864	15,000	2,583	183,354	29,560	67,033	86,762	NA
S1-10kN-AG	39,957	15,121	3,742	262,531	38,627	93,526	130,378	0,431%
S1-10kN-GRG	40,908	15,000	3,643	261,685	39,351	95,005	127,329	NA
S1-15kN-AG	50,048	15,013	4,469	323,878	46,786	116,333	160,760	0,005%
S1-15kN-GRG	50,185	15,000	4,454	323,738	46,892	116,549	160,296	NA
S1-20kN-AG	58,696	15,009	5,069	377,490	53,814	136,393	187,283	0,017%
S1-20kN-GRG	58,029	15,000	5,134	377,364	53,269	134,766	189,330	NA

Tabela 66. Simulação s2 para o vão de 550 cm

Fonte: Próprio autor.

Como nas simulações s1 e s2 as variações médias dos resultados do AG foram inferiores a 1% garantindo que o valor ótimo foi encontrado com

maior exatidão.

Quando comprados os desvios dos resultados do AG e do GRG os desvios foram em sua maioria inferiores a R\$ 0,50, com exceção do teste s4-2kN que desviou R\$ 0,80, valor que é irrisório do ponto de vista de uma análise isolada de uma viga por um processo numérico.

Afim de comparar a evolução do custo no sentido que o vão aumenta e consequentemente os esforços de flexão da estrutura apresenta-se a Tabela 67 com essa comparação do custo em função do vão.

Simulação	Custo total (R\$) vão 400 cm	Custo total (R\$) vão 450 cm	Custo total (R\$) vão 500 cm	Custo total (R\$) vão 550 cm
2kN-AG	62,669	78,774	96,575	117,057
2kN-GRG	62,517	78,594	96,507	116,256
5kN-AG	98,027	123,533	152,126	183,425
5kN-GRG	97,902	123,432	151,916	183,354
10kN-AG	139,462	175,955	216,706	262,531
10kN-GRG	139,214	175,779	216,603	261,685
15kN-AG	172,076	217,346	268,006	323,878
15kN-GRG	171,945	217,251	267,849	323,738
20kN-AG	200,409	253,171	312,575	377,490
20kN-GRG	200,234	253,093	312,137	377,364

Tabela 67. Evolução do Custo total (R\$) em função da simulação

Fonte: Próprio autor.

É possível perceber que o aumento do custo total (R\$) da viga com vão de 400 cm para a viga com vão de 550 cm varia de cerca de 86% a cerca de 88%.

Comparando agora a evolução da altura h (cm) em função do vão (m) obtém-se o ábaco da Figura 105. Com a observação de que o ábaco foi construído em cima de valores médios do AG e GRG para cada vão, visto

que isso só foi possível devido a variação entre os métodos ser estritamente baixa.

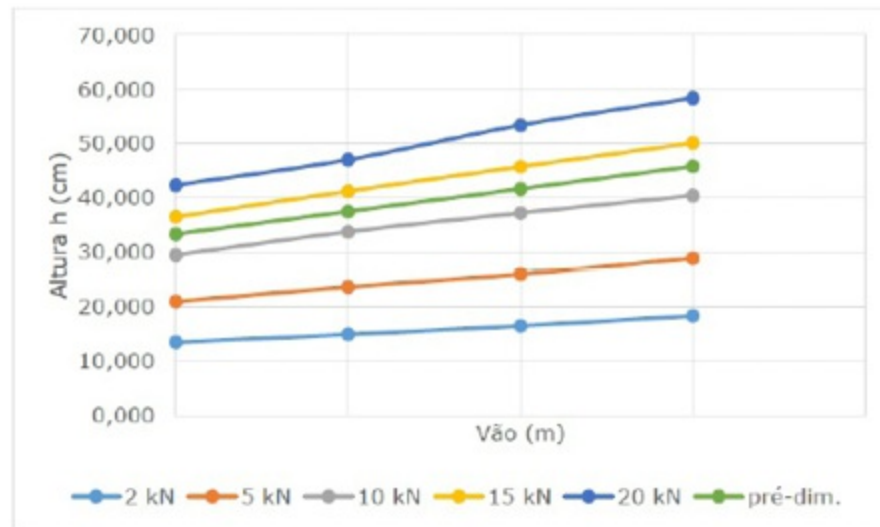


Figura 105. Evolução da altura h (cm) versus o vão L (cm) da peça

Fonte: Próprio autor.

Comparando os resultados obtidos na Figura 105 e o método de prédimensionamento de vigas de concreto disposto em Pinheiro et al. (2003), que indica que a altura da peça é dada por $1/12$ avos do vão, percebe-se que até 10 kN o otimizador retornou alturas abaixo desse tipo de pré-dimensionamento. Para a carga de 15 kN e 20 kN o otimizador teoricamente não foi eficiente quanto ao método de Pinheiro et al. (2003).

Conclusões ou considerações finais

As simulações em todos os casos apresentaram resultados que utilizam base mínima, modificando assim apenas a altura da estrutura. Observa-se então que a altura da peça é a variável de maior relevância para a otimização, tendo em vista que geralmente a base da viga é definida no projeto arquitetônico, porém deve-se levar em conta o fato de que o detalhamento da armadura longitudinal da viga em uma seção de base muito pequena pode ser

problemática e o programa não prevê uma variação do centro de gravidade da armadura longitudinal.

O algoritmo bio-inspirado AG tem a característica da geração de indivíduos aleatórios para a inicialização da população do algoritmo, há uma possibilidade pequena, segundo os limites impostos para a geração aleatória de indivíduos, de que a solução ótima possa ocorrer na primeira geração.

Mantido o carregamento a diferença do custo total entre AG e GRG são mínimas podendo ser adotado um valor médio como o resultado padrão.

Considerando o mesmo vão verifica-se uma redução da eficiência da otimização em cenários onde o carregamento é maior que 10 kN. Fato que deve ser investigado com maior critério, pois o método de pré-dimensionamento de Pinheiro et al. (2003) é empírico, podendo ser que a altura gerada para viga com esse método não seja passível de passar em todas as verificações estabelecidas pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

A otimização do preço ocorre pela mudança de forma da seção transversal, tal seção possui uma maior área de aço porém sua vantagem econômica é efetivada pela diminuição no volume de concreto e área de forma.

As considerações foram feitas baseadas apenas em aspectos do dimensionamento das seções transversais, não levando em conta assim outras características importantes de detalhamento e verificação. Tal situação deve ser melhorada para que os ábacos sejam gerados com mais exatidão garantindo que a viga pré-dimensionamento via otimizador também obtenha êxito no dimensionamento real de projeto.

O método GRG utilizando a ferramenta solver incorporada ao Microsoft Excel possui a vantagem de exigir menos tempo de computação e esforço computacional da máquina assim como maior facilidade de implementação da rotina de otimização, ao passo que o AG desenvolvido no Maple 18 leva uma média de 16 segundos sendo executado por um processador com

frequência de 2.5 GHz em sua execução e gerando um considerável esforço computacional na máquina. Vale salientar que tais resultados dependem das características da máquina que executa o algoritmo, sendo que quando o código foi executado em uma máquina mais poderosa o tempo gasto caiu pela metade obtendo a média de 7 segundo em um processador com frequência de 3.9 GHz.

Conclui-se que ambos os métodos obtêm resultados satisfatórios de otimização, significando uma economia quando aplicada em larga escala.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- CARVALHO, Roberto C.; FIGUEIREDO FILHO, Jasson R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EduFSCar, 2014.
- DAVIS, Lawrence. The Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- ESHELMAN, Larry J.; MATHIAS Keith E.; SCHAFFER J. David. Crossover Operator Biases Exploiting the population Distribution, Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann,, San Francisco, CA, 1989.
- KLEIN, Henardt Weber. **Otimização de vigas de concreto armado**: Dimensionamento a flexão. Ijuí: UNIJUI, 2008.
- MAIA, João Paulo R. **Otimização Estrutural**: Estudo e aplicações de problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta solver. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MITCHELL, Melanie. An introduction to genetic algorithms. Cambridge: MIT Press, 1999.
- PACHECO, M. A. C. **Algoritmos Genéticos**: Princípios e Aplicações. In: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, ICA. Departamento

de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.

GIONGO, José Samuel. **Concreto armado**: projeto estrutural de edifícios. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. (Apostila)

PINHEIRO, Libânio M.; et al. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003, p. 2-10. (Apostila).

SACOMAN, Marco Antônio R. **Otimização de projetos utilizando GRG, Solver e Excel**. In: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, Pará, 2012.

Notas

79. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Regional Goiânia, Escola de Engenharia. Contato: heitor_lima93@hotmail.com.

80. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Regional Goiânia, Escola de Engenharia. Contato: nalecrim099@hotmail.com.

81. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.

82. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Regional Goiânia, Escola de Engenharia, Contato: robsonlopesvetor@gmail.com.

Uso do amido de sorgo como depressor na flotação de apatita

*Dafne Letícia Florêncio*⁸³

*André Carlos Silva*⁸⁴

*Elenice Maria Schons Silva*⁸⁵

*Vitor Hugo Caixeta*⁸⁶

Resumo: Entre os minerais fosfatados destaca-se o grupo das apatitas, sendo essas consideradas a principal fonte de fosfato, muito utilizada na produção de fertilizantes agrícolas. Os depósitos de origem ígnea destes minerais possuem mineralogia complexa, contendo impurezas que influenciam sua recuperação no processo de flotação. Sendo assim é fundamental o conhecimento do comportamento do sistema dos reagentes para a eficiência da flotação. Ácidos graxos são adotados como coletores e amidos como depressores na flotação industrial de rocha fosfática. O presente trabalho buscou analisar a eficiência do amido de sorgo como depressor de apatita através de ensaios de microflotação em Tubo de Hallimond. Testes foram realizados com 1 g de apatita de alta pureza, usando Flotigam 5806 da Clariant (300 g/t) como coletor e variando-se o pH, o tipo e a dosagem do depressor. Os resultados obtidos indicam que o sorgo pode ser uma alternativa ao milho como depressor na flotação de apatita.

Palavras-chave: Flotação, depressor, sorgo, apatita.

Introdução

A flotação consiste em uma técnica largamente utilizada na indústria para concentração mineral, é um processo de natureza físico-química que explora as diferenças de características superficiais dos diversos minerais. Segundo

Baltar (2008), a flotação é a mais versátil e eficiente técnica de beneficiamento de minérios, sendo também a mais complexa.

A flotação é caracterizada pela concentração de minerais hidrofóbicos. O processo ocorre da seguinte maneira: minerais hidrofóbicos aderem às bolhas de ar, os quais são movidos para a superfície da polpa e posteriormente removidos do sistema, já a parcela hidrofílica permanece em suspensão com a superfície recoberta por moléculas de água (Baltar, 2008). Visto que poucas espécies minerais são naturalmente hidrofóbicas faz-se necessário o uso adequado de determinados reagentes que permitam o controle das superfícies.

O desenvolvimento da flotação pode ser influenciado por fatores relacionados tanto às características do minério que são aqueles inerentes à sua composição mineralógica, físicas, químicas e tecnológicas dos minerais presentes, quanto por fatores ligados diretamente à flotação que compreendem as condições dos equipamentos, características da água, pH, reagentes, tempos de condicionamento e tempos de flotação (Neder e Leal Filho, 2006 apud Sousa, 2016).

Reagentes de flotação são compostos orgânicos e inorgânicos empregados com o objetivo de controlar as características das interfaces produzidas no processo (Peres, 2007). Estes podem ser classificados em coletores, modificadores ou espumantes de acordo com a função específica desempenhada na flotação.

Os depósitos formados por minerais fosfatados possuem uma complexa mineralogia, contendo impurezas que influenciam sua recuperação das usinas de beneficiamento, logo, para o uso desses minerais fosfatos é necessário um processamento prévio para reduzir o conteúdo de minerais da ganga (Oliveira, 2007). A flotação é atualmente umas das mais importantes e efetivas operações de concentração, sendo responsável pelo processamento de mais de 20% da produção mundial de rocha fosfática (El-Mofty e Somasundaran, 2002).

A flotação de apatita tem sido objeto de diversos estudos que buscam determinar diferentes reagentes a serem usados no procedimento, assim como identificar outros fatores que possam alterar o resultado da flotação. Estudos de Albuquerque (2010) investigaram as soluções tecnológicas mais recentes aplicadas à indústria de concentração de fosfato, principalmente o emprego de novos coletores (naturais e sintéticos) e depressores utilizados no processo de flotação.

O milho tem sido considerado a fonte primária de amido para atuar como depressor no processo de flotação, porém esse vem sendo destinado às outras fontes na indústria, sendo o estudo de material alternativo de suma importância, a fim de permitir uma maior eficiência do processo produtivo de concentração de minério na indústria, com menor custo. Neste contexto o presente trabalho buscou analisar outras fontes de amido como é o caso do sorgo, que possui uma composição química semelhante ao milho com um custo 20% menor, sendo, portanto, considerado como um amido em potencial que tem como objetivo superar uma ou mais limitações do amido de milho, e assim, aumentar a utilidade e a eficiência deste polímero nas aplicações industriais.

1. Contexto do trabalho

A alta demanda no consumo de fertilizantes e a produção interna insuficiente exigem aumento da produção de fosfatatos, assim estudos como o de Souza (2011), Moraes (2016) e Rocha (2014), buscaram desenvolver alternativas que melhorem as condições de flotação de P_2O_5 através do desenvolvimento de novos reagentes.

Os procedimentos realizados durante este trabalho possuem como objetivo verificar a eficiência do sorgo como uma fonte alternativa de amido a ser utilizado na flotação em comparação ao amido de milho largamente usado.

Um fator importante que justifica a realização do estudo é o preço do sorgo ser consideravelmente inferior ao amido de milho, podendo ser cultivado em locais com alto índice pluviométrico e solos mais pobres. Tendo como foco a comprovação da eficácia do amido de sorgo gelatinizado como depressor na flotação de minérios, com um custo inferior ao amido de milho, mantendo ou superando os teores metalúrgicos obtidos no processo. Sendo, portanto, um estudo de cunho inovador com grande possibilidade de ser aplicado nas indústrias minerais.

2. Metodologia

2.1 Preparo e análise da amostra de apatita

O mineral de apatita para o uso na pesquisa foi adquirido *in natura* de uma empresa de mineração. Já no Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral (LaMPPMin) da Universidade Federal de Goiás a amostra foi devidamente preparada para que pudesse ser utilizada nos ensaios de microflotação, passando por etapas de cominuição em moinhos de bolas, classificado granulométrica a úmido, filtragem a vácuo, secagem em estufa (temperatura média de 60 °C por 24 horas) e separação magnética usando ímã manual de terras raras (campo magnético de 2 kG) visando a remoção de eventuais impurezas oriundas da etapa de cominuição.

Para a análise da composição química do mineral utilizado nos ensaios foram enviadas amostras para análise por fluorescência de raios-X na Copebrás S/A utilizando um AXIOX MAX, série DY e nº 5001 da PANalytical. Imagens de MEV foram obtidas no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) da UFG utilizando um Jeol, JSM - 6610 e EDS da Thermo Scientific NSS Spectral Imaging

2.2 Reagentes de flotação

O coletor sintético, Flotigam 5806 da Clariant, utilizado nos ensaios de flotação foi submetido a hidrólise alcalina também designada como saponificação de modo a torná-lo solúvel em água. A metodologia adotada foi estabelecida pela fabricante, compreendendo as seguintes etapas: pesou-se 5 g do coletor em um béquer de 250 mL, previamente tarado. Adicionou-se então 20 g de água destilada. A solução foi mantida sob agitação magnética por 5 minutos. Adicionou-se 7,5 mL de NaOH a 10 %, mantendo a agitação por mais 5 minutos. Ao final do processo o béquer foi novamente pesado e adicionou-se água destilada até atingir 100 g de solução. O conjunto foi novamente disposto no agitador magnético, agitando-se por 10 min, para completa homogeneização.

Os ensaios de flotação foram realizados com três depressores: amido de milho, farinha de sorgo e amido de sorgo. O sorgo utilizado, do tipo granífero, foi doado pela empresa Agrocere. Os grãos foram peneirados para a remoção de contaminações, secos em estufa a 60 °C por 24 horas e posteriormente moídos, obtendo-se assim a farinha de sorgo, da qual foi extraído o amido. O amido de milho foi adquirido no mercado local.

Visto que amidos são insolúveis em água em temperatura ambiente, os mesmos foram submetidos a um procedimento de solubilização, também denominado gelatinização. O método de gelatinização adotado foi a gelatinização alcalina com uso de NaOH. Para que esse fosse totalmente dissolvido, seu preparo compreendeu as seguintes etapas: pesou-se 5 gramas do amido em um béquer de 250 mL. Adicionou-se 50 mL de água destilada e dispôs o conjunto em um agitador magnético. Ligou-se a agitação por 2 minutos e em seguida foram adicionados 13,5 mL de NaOH a 10%, mantendo a agitação por cerca de mais 5 minutos. Transferiu-se a solução para um balão volumétrico de 500 mL e aferiu com água destilada.

2.3 Ensaios de microflotação

Os ensaios foram realizados usando um Tubo de Hallimond modificado (volume interno de 320 mL), uma vez que este constitui um método de fácil determinação da hidrofobicidade (ou hidrofiliidade) dos minerais, permitindo definir se o reagente empregado é eficaz na concentração do mineral analisado (Silva, 2013). Foram utilizadas amostras de apatita na granulometria -150+106 μm (-100+150#), variando-se o pH da solução (9,5;10;10,5 e 11), tipo (amido de milho, farinha de sorgo e amido de sorgo) e a dosagem do depressor (400,800 e 1200 g/t).

As variáveis operacionais dos testes foram definidas de acordo com a literatura. A Tabela 68 resume as variáveis operacionais para os testes realizados. Todos os testes foram realizados em triplicata, e o resultado final considerou a média desses.

VARIÁVEL OPERACIONAL	VALOR
Vazão de ar (cm^3/min)	40
Pressão de ar (psi)	10
Coletor	Flotigam 5806 da Clariant
Dosagem do coletor (g/t)	300
Tempo de condicionamento com o coletor (min)	7
Tempo de condicionamento com o depressor (min)	5
Tempo de flotação (min)	1
Massa do mineral (g)	1
Faixa granulométrica (μm)	-150+106
Dosagem do depressor (g/t)	400, 800 e 1200
pHs	9,5; 10; 10,5 e 11

Tabela 68. Condições operacionais dos testes de microflotação

Fonte: Próprio autor.

Após a preparação do coletor e depressor, para que os ensaios fossem realizados pesou-se 1 g do mineral, o qual foi introduzido juntamente com a

barra magnética e água destilada, preparado no pH a ser utilizado, na parte inferior do tubo, primeiramente foi introduzida a dosagem de depressor e condicionado por 5 minutos para em seguida ser adicionado o coletor e ter o condicionamento por mais 7 minutos. Abriu-se a vazão de ar, e iniciou-se a flotação que levou 1 minuto. Após o término do tempo fechou-se a vazão de ar.

Para a limpeza do tubo inicialmente retirou-se o material flotado por meio do alívio no grampo da mangueira ligada ao vidro superior, sendo realizada lavagem para retirada do material remanescente com o auxílio de um béquer de 500 mL, em seguida o material afundado foi retirado também por meio do alívio da mangueira ligada à parte inferior e lavado para a coleta do material restante também com o uso de um béquer de 500 mL. Após a limpeza do tubo e a disposição do material afundado e flotado em béqueres separados, esses foram filtrados a vácuo e secos em estufa a 70 °C por 12 horas.

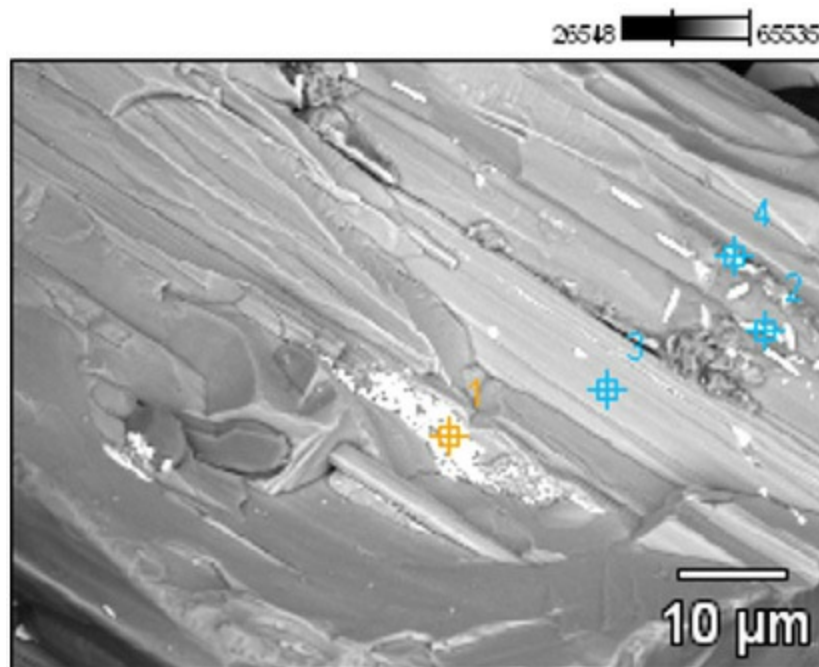
A recuperação de apatita foi calculada a partir da relação entre a massa mineral flotada e a soma das massas flotada e afundada, conforme mostrado na equação I.

$$\text{Recuperação(\%)}: \frac{\text{Massa Flotada}}{\text{Massa Flotada} + \text{Massa Afundada}} \times 100 \quad (1)$$

3. Discussão e resultados

A Figura 106-A mostra a presença de uma fase mineral secundária (ponto 1), confirmada análise do EDS (figura 106-B). A presença do elemento Ag no espectro da amostra não é usual, uma vez que a amostra de apatita era de origem ígnea. Nota-se também a presença de Cl e F, indicando que a amostra pode-se tratar de uma associação de fluorapatita e clorapatita.

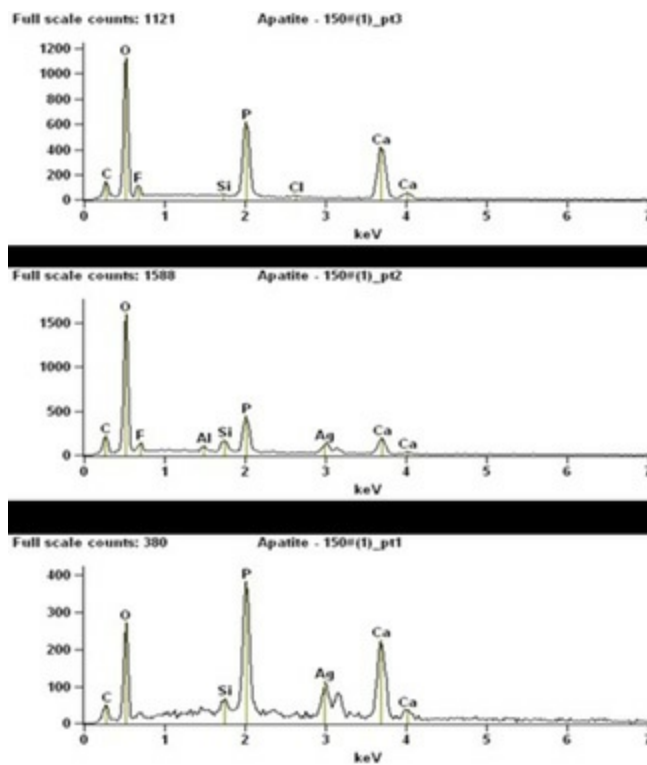
(a)



Amostra: apatita -150+106 μm

Voltagem de aceleração: 10,0 kV

Magnificação: 1600x



(b)

Figura 106-A. (a) Imagem por MEV da amostra de apatita e (b) resultados de EDS para três pontos diferentes da amostra

Fonte: Próprio autor.

Uma análise por difração de Raio-X permitiu verificar que a amostra de apatita possuía alta pureza (95.5%), conforme apresentado na Tabela 69.

P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	SO ₃	I	Cl	Na ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO
38,49	54,02	1,10	0,63	0,39	0,34	0,27	0,11	0,11	0,06

Tabela 69. Análise por difração de raios-X da amostra de apatita

Fonte: Próprio autor.

A Figura 107 mostra a recuperação da apatita em função da dosagem dos depressores utilizados. Inicialmente identifica-se a variação da recuperação nos testes em branco (apenas com adição do coletor e sem a adição de depressores), uma vez que a recuperação de apatita variou com a modificação do pH. A maior recuperação obtida foi em pH 10 ($87,5 \pm 8,4\%$) e a menor em pH 11 ($23,18 \pm 3,18\%$).

A presença dos depressores promoveu significativa redução na flotação de apatita, como esperado. Para o amido de milho, os melhores resultados foram obtidos em pH 10 e 10,5. Os resultados obtidos para o amido de sorgo indicam que a interação deste reagente com a apatita foi menos significativa que o observado para a farinha de sorgo. Desta forma, a farinha de sorgo deprimiu maior quantidade de apatita que o amido de sorgo. É possível ainda notar que o amido de sorgo apresentou melhores resultados nos pHs 9,5 e 11 quando comparado ao amido de milho. Nos referidos pHs o amido de sorgo obteve resultados similares à farinha de sorgo.

Destaque pode ser dado para a farinha de sorgo. A depressão de apatita com este reagente foi consideravelmente menor que para os outros dois. A

menor recuperação de apatita com este depressor foi obtida em pH 11 e dosagem de 1200 g/t ($1,4 \pm 0,4\%$). Em pH 10, pH no qual obteve-se a maior recuperação nos testes sem adição de depressor ($87,5 \pm 8,4\%$), o uso da farinha de sorgo com dosagem de 1200 g/t provocou uma queda na recuperação de apatita para $2,3 \pm 1,2\%$. Já para o amido de milho a recuperação de apatita nas mesmas condições foi de $8,1 \pm 1,5\%$ e $12,0 \pm 1,4\%$ para o amido de sorgo.

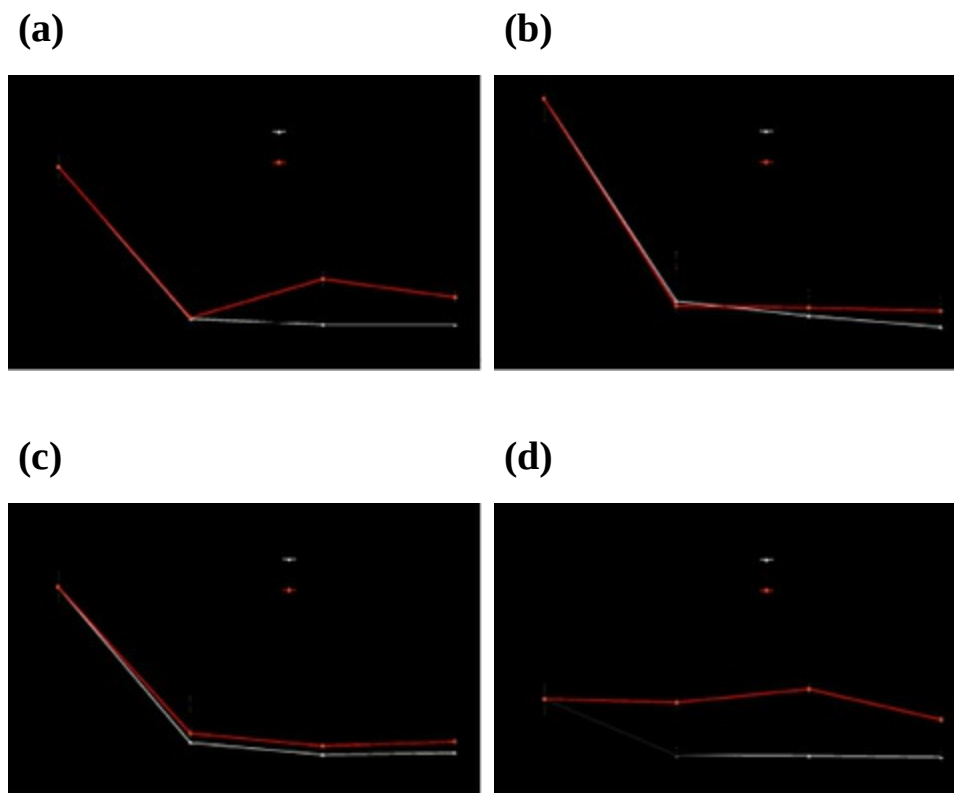


Figura 107. Recuperação apatita em função dos diferentes depressores em pH (a) 9,5; (b) 10; (c) 10,5 e (d) 11

Fonte: Próprio autor.

Conclusões

Os resultados obtidos com os testes realizados mostram que o sorgo é um depressor alternativo eficaz a ser utilizado na flotação de apatita. Ao

comparar as recuperações obtidas com os três depressores é possível notar que a farinha de sorgo foi a mais eficiente, produzindo menores recuperações.

Os ensaios realizados permitem inferir que interação da farinha de sorgo com a apatita é mais forte quando comparada ao amido de milho e ao amido de sorgo. Além de apresentar melhores resultados de depressão de apatita, a farinha de sorgo é o depressor mais barato entre os três testados, uma vez que seu preparo consiste apenas na moagem do grão de sorgo.

Embora o amido de milho seja atualmente o depressor mais utilizado no Brasil, outras fontes botânicas, tais como o sorgo (farinha ou amido), possuem potencial técnico e econômico para igualar, ou até mesmo superar, seus resultados. Estudos em sistemas de flotação (célula e/ou coluna) com minério de rocha fosfática são necessários de modo a verificar se os resultados obtidos em tubo de Hallimond são válidos para minérios complexos. O *scale up* para escala piloto e industrial são igualmente necessários e importantes. Recomenda-se ainda a realização de estudos a fim de comprovar a viabilidade econômica do uso do sorgo em escala industrial pelas indústrias do setor mineral, bem como a realização do *Life-cycle analysis* (LCA) para o sorgo.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CNPq, CAPES, FAPEG e FUNAPE pelo suporte financeiro que possibilitou esta pesquisa. E adicionalmente, à Agrocereis por ceder os grãos de sorgo, a CMOC pela análise por DRX e à Universidade Federal de Goiás.

Referências

ALBUQUERQUE, Rodrigo Oscar de. **Alternativas de processo para concentração do minério fósforo-uranífero de Itatiaia**. 2010. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- BALTAR, Carlos Adolpho M. **Flotação no Tratamento de Minério**. Recife: UFPE, 2008.
- EL-MOFTY, H. E.; SOMASUNDARAN, P. Surface chemical characteristics and adsorption properties of calcite as one of the gangue minerals of phosphate ores. *Beneficiation of phosphates: Fundamental and Technology*, Inc. USA, pp. 239-246, 2002.
- FIGUEIRA, Hedda Vargas O.; LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz M. de. Britagem e moagem. In: _____. **Tratamento de minérios**, 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 143-210.
- MORAES, Izabela Letícia A.; SILVA, André Carlos; SILVA, Elenice M. S. Flotação de Apatita Utilizando Óleo de Pinhão-manso. In: NEVES, Adriana Freitas; et al. **Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão**. São Paulo: Blucher, 2016.
- NEDER, Euler Elias; LEAL FILHO, Laurindo de Salles. O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios Brasileiros. **Revista Holos**, v. 1, p. 53-75, 2006.
- OLIVEIRA, Michelly dos Santos. **Minério fosfático sílico-carbonatado: estudo fundamental**. 2007. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- PERES, Antônio Eduardo C.; et al. **Métodos de concentração**. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2007.
- ROCHA, Tércio William P. **Utilização do óleo da castanha de macaúba como coletor na microflotação da apatita**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Organizacional) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.
- SILVA, Elenice Maria S. **Utilização do óleo de Pequi como coletor na microflotação de apatita**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.
- SOUSA, Débora Nascimento. **Depressores alternativos na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Organizacional) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.
- SOUZA, Adalberto Leles de. **Avaliação do desempenho de depressores na flotação direta do minério fósforo-uranífero de Itatitaia**. 2011. 101 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Notas

83. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: dafne_leticia@hotmail.com.

84. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial Engenharia. Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral. Contato: ancarsil@ufg.br

85. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral. Contato:eschons@ufg.br.

86. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: vitor_hugo_gyn@hotmail.com.

Estudo sobre a proposta de implantação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) na edificação de escritórios em uma mineradora

*Hugo Silva Martins*⁸⁷

*Ricardo Ribeiro Moura*⁸⁸

*André Alves de Resende*⁸⁹

*Rafael Rosa Da Silva Guimarães*⁹⁰

Resumo: O presente artigo tem como objetivo propor a instalação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) eficiente na edificação de um escritório de uma mineradora. Para isso foram feitos cálculos e medições que levaram aos resultados pertinentes. Além disso, foram observadas as normas técnicas da NBR 5419/01, constante da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para determinar outros parâmetros necessários aos cálculos, à definição do tipo e da natureza da construção, bem como às especificações de materiais. Os resultados apresentam a necessidade de implantação de um SPDA no edifício, para proteção de pessoas e equipamentos.

Palavras-chave: Implementação. Descarga atmosférica. Fatores de Risco. SPDA.

Introdução

Antes do século XVIII fenômenos naturais assustavam e fascinavam o ser humano, que não conseguia explicar as origens ou motivos de tais

acontecimentos, atribuindo-os à ira de deuses, a castigos e provações. De maremotos a erupções vulcânicas, pontuados em torno do planeta, o mais comum são as descargas atmosféricas, por atingirem todo o globo terrestre.

Por sua significativa ação devastadora, oriunda da potência de suas cargas elétricas, é importante que áreas povoadas sejam protegidas da ação dos raios. Diversos são os motivos, porém, o principal consiste na salvaguarda de vidas humanas, seguido da proteção de objetos eletroeletrônicos, edificações, linhas de transmissão, dentre outros. Ainda, segundo Cotosck (2007), é essencial considerar a área de proteção de sistemas elétricos de potência ligados ao consumo humano e também em relação a equipamentos de alto valor agregado, pois assim em muitos casos é possível evitar grandes perdas e também danos ao patrimônio.

Como não há modo de prever ou evitar as descargas de energia elétrica, o que de mais seguro e objetivo se pode fazer é desenvolver e implantar os Sistemas de Proteção contra Descarga Atmosféricas (SPDA), com o intuito de conduzir da melhor forma essas descargas até o solo, dissipando-as e evitando, assim, incidentes maiores, como a perda de vidas e equipamentos. Vale destacar que tradicionalmente os SPDAs vêm sendo utilizados como para-raios, os quais tem como objetivo principal conduzir a energia do raio do ponto de queda do raio até o ponto em que se encontra seu aterramento, de forma mais rápida e segura possível (Araújo, 2010).

Porém, apenas implantar um sistema não é garantia de proteção, implementado não diminui os riscos. Para que seja válido, é imprescindível que atenda a todas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua Norma Brasileira (NBR) 5419/01, que trata da proteção de estruturas contra descarga atmosféricas. Na referida NBR estão regulamentadas todas as condutas, formas, modos e dimensionamentos necessários para o cálculo da necessidade, do tipo e de como implantar o SPDA de maneira correta e segura.

Neste artigo, o objetivo é demonstrar a necessidade do uso de SPDA na edificação de escritórios de uma mineradora. Para isso, cumpriram-se etapas pertinentes, iniciando-se com uma leitura sistemática de bibliografia sobre os temas “SPDA” e “descargas atmosféricas”, da qual foram escolhidos os autores Sueta (2005), Pinto Jr. (2005), Bohn (s/d) e Xavier e Cerqueira (2014), bem como a NBR 5419/01, para montar o referencial teórico. Além disso, foram feitas medições e dimensionamentos no local escolhido como objeto de pesquisa; aplicação das referências da NBR 5419/01; realização dos cálculos; escolha de materiais e sugestão do modo de aplicação. Não se trata aqui de um projeto de implantação, apenas de se comprovar a real necessidade da utilização do sistema.

1. Descargas elétricas e sistemas de proteção

A humanidade sempre teve admiração e temor pelo desconhecido. Sem explicações do que fossem os relâmpagos, geralmente seguidos do estremecedor som dos trovões, o homem, desde tempos remotos, atribuiu às divindades a existência dos fenômenos. Conforme cita Sueta (2005),

“Raios, trovões, enfim, as descargas atmosféricas sempre impressionaram a humanidade, seja impondo respeito ou medo. Desde remotas épocas [...] há indícios deste respeito/medo, através das estátuas de Buda carregando “flechas” de raios, ou no antigo Egito, do deus Typhon (Seta) “atirando” seus raios [...], na Índia (Indra, filho do Céu e da Terra), na Grécia (Zeus, pai dos deuses), na Roma antiga (Júpiter, o deus chefe) e, o mais famoso relacionado com raios, o deus Thor, dos nórdicos. Assim, por muitos séculos, raios foram símbolo de poder e vários deuses o utilizavam para castigar os maus e pecadores” (Sueta, 2005, p. 19)

Entretanto, o cientista Benjamim Franklin, em sua famosa experiência com a pipa, no século XVIII, provou que raios eram apenas fenômenos naturais, uma descarga elétrica de grande magnitude, perigosa, mas que poderia ser conduzida diretamente à terra por meio de hastes de ferro

posicionadas corretamente nas construções. Dessa forma nascia o para-raios de Franklin.

Desde então, os para-raios contribuem para a diminuição de danos causados por descargas atmosféricas, que ao atingirem construções ou objetos, animais ou pessoas, florestas ou pastos, redes elétricas, dentre tantas outras possibilidades, podem causar danos irreparáveis e até mesmo a morte.

1.1 Descargas elétricas

Estudos revelam que o Brasil é o país com maior índice de descargas elétricas do Globo, “por causa de sua grande extensão territorial e a proximidade do equador geográfico.” (Pinto Jr. 2005). De acordo com, são entre 50 a 70 milhões de registros do fenômeno anualmente, o que daria uma média de dois raios por segundo ou sete raios Km²/ano.

As descargas atmosféricas acontecem a partir de processos iniciados nas nuvens, que precisam estar cheias de cargas positivas e negativas que costumam localizar-se em seu quadrante inferior. As duas principais teorias para esse processo de eletrificação, defendidas pelos cientistas, são a teoria da precipitação e a teoria da convecção.

Na teoria da precipitação, de acordo com Sueta (2005),

“[...] as partículas pesadas, que descem na nuvem, interagem com as partículas mais leves, que são carregadas para cima. Nesta interação, as partículas pesadas são carregadas negativamente e as mais leves positivamente, sendo que, após isto, devido à gravidade e às correntes de ar ascendentes, há uma separação das cargas formando um dipolo”

Já na teoria da eletrificação por convecção,

“[...] a carga que foi acumulada perto da superfície da terra, ou sobre regiões de condutividade variável do ar e da nuvem, incluindo a camada das vizinhanças da nuvem, é movimentada em um grande volume pelo fluxo de ar associado às tempestades para os locais mencionados. Essa teoria tem muitos adeptos e algumas controvérsias. Uma vez carregada, a

nuvem com muitas dezenas de cargas positivas e negativas estaria em um ambiente propício para a ocorrência das descargas atmosféricas” (Sueta, 2005)

As descargas atmosféricas têm quatro categorias de formação, a saber: “a iniciada pelo líder descendente com cargas negativas (a mais comum), a iniciada pelo líder ascendente com cargas positivas, a descendente com cargas positivas e a ascendente com cargas negativas.” (Sueta, 2005).

Pinto Jr. (2005) traz essa mesma classificação em seu livro “A arte da guerra contra os raios”, porém de uma maneira mais simples, portanto mais inteligível aos leigos. Segundo ele os relâmpagos ocorrem “da nuvem para o solo e são denominados nuvem-solo; do solo para a nuvem, relâmpagos solo-nuvem; da nuvem para um ponto qualquer na atmosfera, descarga no ar; ou ainda entre nuvens” (Pinto Jr., 2005).

As descargas nuvem-solo, ou raios, são os mais preocupantes dentre todos os tipos, por causa do tamanho de sua força de destruição. O fenômeno que desencadeia o processo de direcionamento das cargas para a terra é denominado “descarga preliminar, ou descarga dentro da nuvem”. Foi da preocupação com os raios que Benjamim Franklin desenvolveu seu sistema de para-raios, que é basicamente o utilizado até os dias atuais.

1.2 Sistema de Proteção contra Descargas Elétricas (SPDA)

O Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) surgiu como forma de dar proteção aos sistemas elétricos e às estruturas e edifícios. Sua função é direcionar e dissipar para a terra as descargas atmosféricas causadas por nuvens eletrificadas pelo atrito e pela movimentação, evitando danos a edificações e a pessoas. Tem também a função de equalizar os potenciais das descidas e os potenciais no solo, devendo haver preocupação com locais de frequência de pessoas, minimizando as tensões de passo nesses locais. Sobre essas duas funções corrobora Bohn (S/D):

PRIMEIRA FUNÇÃO: neutralizar, pelo poder de atração das pontas, o crescimento do gradiente de potencial elétrico entre o solo e as nuvens, através do permanente escoamento de cargas elétricas do meio ambiente para a terra.

SEGUNDA FUNÇÃO: oferecer à descarga elétrica que for cair em suas proximidades um caminho preferencial, reduzindo os riscos de sua incidência sobre as estruturas. (Bohn, s/d)

A grande preocupação que rondava os sistemas no início de seu desenvolvimento era o temor de que descargas elétricas eram atraídas por ele, o que de forma alguma é verdadeiro. Tampouco é correta a afirmativa de que um bom SPDA evitaria a descarga atmosférica de acontecer. Segundo (Bohn, s/d),

“A instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas não impede a ocorrência de raios. Nem tão pouco atrai raios. É preferível não ter para-raios algum do que ter um para-raios mal instalado. Um para-raios corretamente instalado reduz significativamente os perigos e os riscos de danos, pois captará os raios que iriam cair nas proximidades de sua instalação”

No Brasil, é a Norma Brasileira (NBR) 5419/01 da ABNT que regulamenta a instalação e adequação dos sistemas de proteção. De acordo com o caderno da referida NBR, ABNT (2001), “esta norma fixa as condições exigíveis ao projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de estruturas [...], bem como de pessoas e instalações no seu aspecto físico dentro do volume protegido. “ (ABNT, 2001).

Conforme preconiza a NBR 5419/01, não existe maneira de impedir o fenômeno das descargas elétricas, tampouco assegurar “a proteção absoluta de uma estrutura, de pessoas ou bens.” (ABNT, 2001). O que o sistema faz é tão somente diminuir consideravelmente os riscos e prejuízos.

Xavier e Cerqueira (2014) também discorre a respeito da proteção oferecida pelo SPDA:

“Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) vêm sendo desenvolvidos no decorrer dos últimos anos, contudo deve ser destacado que ainda não se conseguiu uma proteção completa ou totalmente efetiva para a descarga atmosférica (raio). É um fenômeno da natureza absolutamente imprevisível e aleatório, tanto em relação às características elétricas (intensidade de corrente, tempo de duração etc.), como em relação aos efeitos destruidores decorrentes de sua incidência sobre as edificações” (Xavier e Cerqueira, 2014)

O SPDA é dividido em um sistema externo e um sistema interno. O sistema externo “compõe-se basicamente de: um subsistema de captação de descidas, um subsistema de aterramento, um subsistema de equipotencialização e definições de distâncias de segurança [...]” (Sueta, 2005). Já o sistema interno é o de ligação equipotencial para descarga atmosférica e da aplicação das distâncias de separação de uma estrutura a ser protegida.

Dentro do sistema externo, o subsistema de captação de descida “tem como função conduzir a corrente da descarga interceptada, de forma [...] que esta não danifique os condutores de descida, seus arredores e também não ocorram descargas disruptivas ao longo do sistema.” (Sueta, 2005). Já o subsistema de aterramento serve para dissipar a corrente da descarga pela terra.

De acordo com a NBR 5419/01,

3.10 subsistemas de descida: Parte do SPDA externo destinada a conduzir a corrente de descarga atmosférica desde o subsistema captor até o subsistema de aterramento. Este elemento pode também estar embutido na estrutura.

3.11 subsistemas de aterramento: Parte do SPDA externo destinada a conduzir e a dispersar a corrente de descarga atmosférica na terra. Este elemento pode também estar embutido na estrutura. (ABNT, 2001)

Quanto aos captadores, três métodos são admitidos pela ABNT: a) ângulo de proteção (método Franklin); b) esfera rolante ou fictícia (modelo eletro geométrico; ou c) condutores em malha ou gaiola (método Faraday). Todos devem obedecer rigorosamente à NBR 5419/01 e seus dispositivos.

O método Franklin é composto por captor, haste, isolador, condutor de descida, eletrodo de terra, aterramento e conexão de medição. Todos os componentes devem ser dimensionados de acordo com os resultados dos cálculos efetuados para o projeto. (Visacro Filho, 2005). Seu funcionamento se dá quando a haste,

“[...] em forma de ponta, produz, sob a nuvem carregada, uma alta concentração de cargas, juntamente com um campo elétrico intenso. Isto produz a ionização do ar diminuindo a altura efetiva de nuvem carregada, o que propicia o raio através do ‘rompimento’ da rigidez dielétrica da camada de ar” (Visacro Filho, 2005)

A gaiola de Faraday – Michael Faraday (1791-1867) – é “formado por um captor, cabos de cobre no formato de uma malha, suportes isoladores e tubos de proteção para os condutores de descida até o solo. (Visacro Filho, 2005). Nesse sistema, o conjunto de captadores é em forma de anel. É um sistema altamente difundido e que fica ainda melhor se utilizado concomitantemente com o método Franklin.

O método esferogeométrico consiste em se rolar uma esfera imaginária com um raio que tenha variação de acordo com o nível de proteção pretendido. Gira-se essa esfera ao redor da edificação e os pontos dela que tocarem a construção serão os pontos que devem ser protegidos.

Dessa forma, os sistemas de proteção podem ser individuais ou híbridos, em que se utilizam pelo menos dois dos métodos normatizados pela ABNT, NBR 5419/01. Todas as fórmulas para os cálculos realizados neste trabalhos seguem os parâmetros preconizados pela NBR 5419/01.

A leitura sistemática de vasto material produzido a respeito de SPDA, do estudo de outros projetos, bem como da leitura do material utilizado para a construção deste referencial teórico serviu, para embasar e dar sustentação científica para as medições e cálculos comprobatórios da necessidade de um SPDA na edificação de escritórios da mineradora. No caso do escritório da mineradora, a medição mostrou que são 60 metros de comprimento (C), 22 metros de largura (L) e 10 metros de altura (A), em que, na nomenclatura em inglês usada para as fórmulas, dá-se que altura é *height*, representada pela letra H, largura é *width*, W, e comprimento é dado pela letra L, de *length*, respectivamente.

2. Necessidade de implantação de SPDA

Para se determinar a existência da necessidade de implantação de um sistema SPDA em uma edificação, é fundamental que se identifiquem os parâmetros encontrados nas diretrizes da NBR 5419/01. A instalação bem-sucedida requer o estudo do terreno, do solo, do sistema climático encontrado na região da construção, bem como dos cálculos para correto dimensionamento dos materiais a serem utilizados no processo e, por fim, a apresentação de um projeto final.

2.1 Fatores de risco

Para que um projeto de instalação de SPDA seja desenvolvido, é necessário que alguns fatores sejam estabelecidos, principalmente, para a seleção correta do nível de proteção a ser aplicado. Primeiramente, as medidas do volume (termo adotado pela ABNT para caracterizar a edificação) devem ser estabelecidas.

Alguns tipos de estrutura pedem o SPDA por sua própria natureza, como se refere à alínea (a), item B.1.2 do Anexo B normativo da NBR 5419/01: “locais de grande afluência de público” (ABNT, 2001).

De acordo com as tabelas B1 a B6, também do anexo B do caderno da

NBR 5419, encontram-se classificados os fatores das estruturas conhecidas e, dentro da aplicabilidade dessas tabelas, a edificação de escritórios da mineradora ficou assim classificada:

a) Nível da estrutura: classificação nível II – edificação que abriga grande número de pessoas;

b) Tipo de ocupação da estrutura = 1,7: escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades;

c) Tipo de construção da estrutura = 0,8: estrutura de aço revestida ou de concreto armado com cobertura metálica;

d) Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos = 1,7: escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público;

e) Localização da estrutura = 0,4: estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (como, por exemplo, florestas ou grandes cidades);

f) Topografia da região = 1: elevações moderadas, colinas. (ABNT, 2001).

O próximo passo foi encontrar o fator de probabilidade ponderada, que se dá pela multiplicação do NPR (frequência média anual de trovoadas na região) por todos os valores das alíneas (b) a (f), e que será tratado no próximo tópico.

2.2 Cálculos para demonstrar a necessidade de utilização do SPDA

Para se chegar aos resultados procurados neste artigo, foram usadas as fórmulas apresentadas nas páginas 21 a 24 da NBR 5419/01.

Com a determinação dos fatores de risco foi possível calcular a área de exposição equivalente (A_e), aplicando-se a fórmula a seguir:

$$A_e = (L \times W) + (2 \times L \times H) + (2 \times W \times H) + (\pi \times H^2) [m^2] \quad (1)$$

Então, tem-se que:

$$A_e = (60 \times 22) + (2 \times 60 \times 10) + (2 \times 22 \times 10) + (3,1416 \times 10^2)$$

$$A_e = 1320 + 1200 + 440 + 314,16$$

$$Ae = 3274,16 \text{ m}^2$$

Outro aspecto medido para que se chegasse à proposta ideal de projeção para instalação do equipamento foi a densidade de descarga para a terra e o **risco de exposição (Nda)**, dada pela fórmula em que **Nt** é o **número de trovoadas na região**, de acordo com o mapa disponibilizado no caderno da NBR 5419/01.

$$NDA = 0,04 \times Nt^{1,25} [Km^2/ano] \quad (2)$$

$$NDA = 0,004 \times 801,25$$

$$NDA = \mathbf{9,67 \text{ Km}^2/ano}$$

Além disso, a **frequência média anual previsível de descarga (NPR)** também foi calculada pela fórmula:

$$NPR = NDA \times Ae \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$NPR = 9,57 \times 3274,16 \times 10^{-6}$$

$$NPR = \mathbf{0,0313 \text{ ou } 31,33 \times 10^{-3}}$$

O **fator de probabilidade ponderada (Po)** se dá pela fórmula a seguir, em que os fatores (b) a (f) foram estabelecidos de acordo com a NBR 5914/01.

$$Po = NPR \times (b) \times (c) \times (d) \times (e) \times (f) \quad (4)$$

$$Po = 0,0313 \times 1,7 \times 0,8 \times 1,7 \times 0,4 \times 1$$

$$Po = 0,0289 \text{ ou } 28,94 \times \mathbf{10^{-3} \text{ descargas/ano}}$$

Segundo Stefani (2011), de acordo com as especificidades internacionais e com a NBR 5419/01,

- Riscos maiores de 10^{-3} são inadmissíveis e, portanto, existe a necessidade de instalação de um SPDA
- Riscos menores de 10^{-5} representam um valor aceitável e não há necessidade de instalação de um SPDA
- No caso de riscos entre 10^{-5} e 10^{-3} a instalação de um SPDA vai de acordo com a conveniência do usuário. (Stefani, 2011)

Portanto, o valor de P_o obtido pelos cálculos atinge o requerido para que se classifique a implementação do SPDA como **necessária**, na edificação para a qual os estudos foram realizados: a edificação de escritórios da mineradora.

2.3 Especificações de material

Uma vez estabelecida a necessidade da instalação do SPDA, torna-se de suma importância, na apresentação de um projeto viável, a especificação do material a ser utilizado em toda a estrutura.

No desenvolvimento deste trabalho a sugestão aqui oferecida é para um projeto de instalação de SPDA que utiliza os modelos de Franklin e de Faraday. Nesse sentido, a aplicação dos materiais deve seguir incondicionalmente as especificações técnicas e a escolha do tipo de material deve, rigorosamente, seguir a bitola indicada. A seguir são apresentadas as recomendações de projeto de instalação de SPDA:

Os condutores de descida, responsáveis por levar a corrente de descarga atmosférica do condutor à terra, para dissipação, de acordo com a classificação da NBR 5419/01, que classifica a edificação de escritórios da mineradora como Nível II, deverão ter 15 m de distância;

A seção mínima de condutores de descida, para uma estrutura de até 20 metros de altura, segundo as especificações da NBR 5419/01, é de 16 mm² para material de cobre, 25 mm² para material de alumínio e para o aço galvanizado, 50 mm²;

O anel de equipotencialização deve ser de cabo de cobre, de 35 mm², segundo recomenda a NBR 5419/01, enterrado a aproximadamente 50 cm.

O cabo de proteção da borda, que também serve como anel de equipotencialização e deve estar ao redor de todo o edifício, interligando os captadores e também agindo como um. Pode ser de cobre, alumínio ou aço

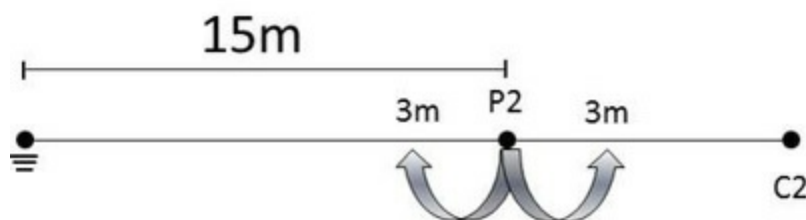
galvanizado, a 25, 70 e 50 mm² respectivamente, segundo os parâmetros que NBR 5419/01 estabelece como sessão mínima para esse componente.

A ligação de todos os pontos de aterramento, ou ligações equipotenciais, responsável por equalizar os diferentes potenciais no caso de uma descarga elétrica atingir a edificação, pode também ser de cobre, alumínio ou aço galvanizado, respeitando a bitola de 16, 25 e 50 mm² respectivamente, de acordo com a sessão mínima determinada pela NBR 5419/01.

2.4 Cálculos de aterramento

Após a definição dos parâmetros e cálculos que constatarem a real necessidade de se implantar o SPDA na edificação de escritórios da mineradora, foi necessário fazer medições para o cálculo de aterramento.

Após as medições, os cálculos foram aplicados para definir quantas hastes serão necessárias para um projeto nessa edificação. Sendo que este deve atender a todos os requisitos da NBR 5419/01 e também apresentar uma resistência de aterramento menor que dez ohms. A Figura 108 apresenta três pontos de medição que foram utilizados como comparativo para o cálculo da resistência de aterramento.



Fonte: Autores 2017.

No primeiro ponto de medição foi fixado um eletrodo de tensão a 24 metros e o eletrodo de corrente a 40 metros da terra a ser medido. Nesse ponto, a medição foi de 100Ω. Seguindo com a medição, a segunda leitura foi obtida movendo-se o eletrodo de tensão três metros em relação à posição da primeira medição (21 metros), no sentido do aterramento a ser medido, o que

resultou uma leitura de 80Ω e para o terceiro. A terceira leitura foi feita movendo-se o eletrodo de tensão em três metros em relação à sua posição na primeira leitura, (27 metros), no sentido do eletrodo de corrente (C2), obtendo-se o resultado de 60Ω . Se a diferença entre a segunda e a terceira leituras for menor ou igual a 10% da primeira leitura, então o valor da resistência de terra é a média aritmética das três leituras.

A média das medições é dada por:

$$(1^{\circ} + 2^{\circ} + 3^{\circ}) / 3 \quad (5)$$

$$(100 + 80 + 60) / 3 \text{ (sendo 3 correspondentes ao número de medições)}$$

$$240 / 3 = 80 \Omega$$

A média, que representa a resistividade do solo (R_s), no caso das medições apresentadas seria, então, de 80Ω . Entretanto, a fórmula 6 dá o percentual dessa resistividade:

$$(2^{\circ} - 3^{\circ}) / 1^{\circ} \quad (6)$$

$$(80 - 60) / 100 = \mathbf{0, 2 \text{ ou } 20\%}$$

Dessa forma, toma-se como R_s a medição do primeiro ponto, 100Ω , para se executar o cálculo da resistência do aterramento (R_f), dado pela fórmula 7, em que L é o comprimento da haste. As hastes encontradas no mercado são de 3 metros de comprimento por $\frac{1}{2}$ polegada de diâmetro.

$$R_f = R_s / L \quad (7)$$

$$R_f = 100 / 3 = \mathbf{33,3 \Omega}$$

A quantidade de hastes necessárias para a montagem de um projeto para a edificação estudada dá-se por

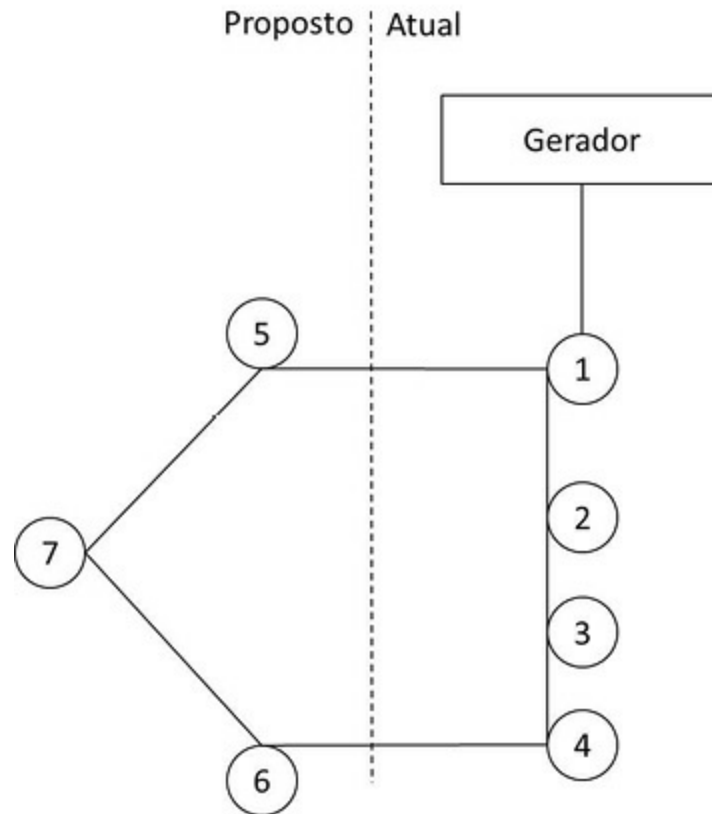
$$\text{Haste} = R_f / \text{Resistência desejada } (\Omega) \quad (8)$$

$$\text{Haste} = 33,3 / 5 \cong 7$$

Portanto, um projeto de SPDA a ser feito para a edificação de escritórios da mineradora requer sete hastes de 3m de comprimento por $\frac{1}{2}$ polegada.

O desenho da Figura 109 demonstra o projeto atual e o proposto por este estudo. O atual conta com quatro hastes de aterramento. Para atender ao

número das sete hastes propostas, é necessário que se acrescente três hastes de aterramento na medida proposta de 3 metros de comprimento por $\frac{1}{2}$ polegada, conforme demonstrado no esquema a seguir.

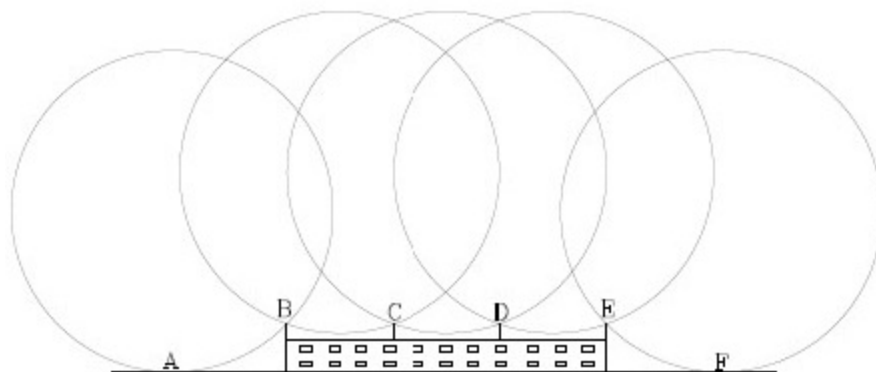


Fonte: Autores 2017.

No esquema, os pontos 1, 2, 3 e 4 são as hastes do projeto atual e os pontos 5, 6 e 7 representam as hastes a serem implantadas nesta proposta.

3. Método de aplicação

Com todos os dados que provam a necessidade do SPDA, as especificações dos materiais e das hastes, determinou-se que o método de aplicação a ser utilizado é o esferogeométrico. Dessa forma, um pequeno modelo foi construído digitalmente (Figura 110), aplicando-se as esferas ao redor da edificação.



Fonte: Autores 2017.

No modelo apresentado, o raio de atração (R_a), ou raio da esfera rolante, foi determinado de acordo com o nível de proteção II, encontrado durante o levantamento das especificações preconizadas pela NBR 5419/01, no caso, um raio de 30 metros.

Os pontos A, B, C, D, E e F são tocados pela esfera, de modo que determinam os pontos que devem receber os captores, formando uma região protegida. Os pontos B, C, D, E poderiam ser menores, entretanto, os utilizados são os padrões de mercado.

De acordo com as indicações da esfera, dentro da escala, os pontos de proteção devem distar aproximadamente 15m entre si. A partir dessa definição, os métodos de Franklin e de Faraday são sugeridos como solução de implementação do SPDA, em uma instalação híbrida, utilizando-se os captores de borda, ligando-os às hastes do topo, formando a gaiola. Assim, o projeto desenvolvido pode se tornar economicamente mais viável.

Considerações finais

A importância ímpar de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, principalmente em espaços e edificações com grandes aglomerados humanos, que deve ser a maior preocupação de qualquer setor, principalmente da engenharia e da segurança. Depois, sim, deve existir

preocupação com equipamentos e as próprias benfeitorias existentes, pelo devastador nível de estragos causados por esse tipo de fenômeno natural e imprevisível.

Neste estudo, em que o propósito era demonstrar a real necessidade da utilização de SPDA, os cálculos e a aplicação das diretrizes da NBR 5419/01 cumpriram rigorosamente seu papel, alcançando o objetivo. A edificação de escritórios da mineradora, definitivamente necessita do sistema. Devido a grande incidência de raios na nossa região e de suma importância a implementação do SPDA para a proteção de equipamentos de alto valor e de pessoas, a queima destes equipamentos pode causar um grande transtorno para a empresa podendo até parar a produção.

O projeto em si não foi desenvolvido, pois não cobre o escopo deste artigo. Porém, os cálculos e observações aqui constantes podem, e devem ser utilizados para o desenvolvimento de um projeto viável, que possa ser apresentado à instituição. E que ele possa ser executado, dentro de todas as especificações técnicas, para que a segurança humana e material seja preservada.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419/01: Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas**. Rio de Janeiro, 2001.
- ARAÚJO, Marcel Ayres de. **Projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para uma linha de transmissão de 69 kV**. 2010. 122 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BOHN, Ricardo Adolar. **Projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas**. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. (Apostila). Disponível em: <<http://bit.ly/2peJlf7>>. Acesso em: 16 out. 2014.

- COTOSCK, Kelly Regina. **Proteção de sistemas elétricos**: Uma abordagem técnico-pedagógica. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- PINTO Jr., Osmar. **A arte da guerra contra os raios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- STÉFANI, Rodrigo Verardini de. **Metodologia de projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas para edifício residencial**. 2011. 54 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SUETA, Hélio Eiji. **Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas**: uma visão relativa aos danos físicos. 2005. 288 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- VISACRO FILHO, Silvério. **Descargas Atmosféricas**: uma abordagem de engenharia. São Paulo: Artiber Editora, 2005.
- XAVIER, Edson dos Santos; CERQUEIRA, Edgarde G. **Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas aplicados na construção civil**. Universidade Católica do Salvador. Salvador, 2014. (Apostila)

Notas

- 87.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Energia. Aluno do Programa de pós-graduação em engenharia de produção. Contato: hugomartins@siemens.com.
- 88.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Energia. Docente do Curso de Engenharia de Produção. Contato: ricardoribeimoura@gmail.com.
- 89.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Fabricação Mecânica. Docente do Curso de Engenharia de Produção. Contato: aaresende@gmail.com.
- 90.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Energia. Programa Institucional de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIVITI). Contato: rafaelrosa.gui@gmail.com.

Estudo da influência do ângulo de impressão e percentual de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças confeccionadas por extrusão de material

*Stéfany Mayara Ferreira de Rezende*⁹¹

*Bruno Alves Maia*⁹²

*Marcelo Henrique Stoppa*⁹³

Resumo: A impressão 3D por extrusão de material tem conquistado cada vez mais espaço em aplicações devido a sua alta capacidade de personalização do produto a baixos custos. É uma tecnologia recente e, portanto, existe muito a ser explorado de forma a maximizar e otimizar a eficiência e o desempenho de seus produtos. Visando a obtenção de maiores conhecimentos sobre as propriedades mecânicas dos objetos confeccionados por esta técnica, este trabalho apresenta um estudo experimental e estatístico sobre a influência de parâmetros, a saber, o ângulo de impressão e o percentual de preenchimento na resistência à tração, de objetos confeccionados em PLA (ácido poliláctico) pela extrusão de material. O estudo identificou que tais parâmetros são altamente significativos para a resistência mecânica dos componentes impressos.

Palavras-chave: Impressão 3D. Caracterização de Materiais. PLA. Ângulo de impressão. Percentual de preenchimento.

Introdução

Uma tecnologia que vem surpreendendo e despertando o interesse de diversas áreas devido as suas características inovadoras, é a impressão 3D.

Esse novo processo de manufatura contorna limitações que ocorrem nas técnicas convencionais, como maior liberdade de design, criação de protótipos, alta capacidade de customização, entre outros (Afrose et al., 2015; Lee, Abdullah e Khan, 2005; Ostuzzi et al., 2015; Torrado et al., 2015).

O conceito de manufatura aditiva foi desenvolvido em 1984 por Charles Hull, e essa tecnologia propiciou o desenvolvimento de novas técnicas de impressão 3D. Dentre esses processos, o que utiliza a extrusão de material (ME, *Material Extrusion*), se tornou o mais difundido, por ser mais simples e barato, com relação às demais. O ME realiza a confecção do objeto camada a camada, por intermédio da extrusão de materiais termoplásticos (Hull, 2015; Groth et al., 2014).

A qualidade dos objetos fabricados por impressão 3D depende da seleção adequada do termoplástico e dos parâmetros de construção. Os materiais mais utilizados neste processo são o Ácido Polilático (PLA) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Isto se deve, ao fato de trabalharem com temperaturas que não necessitem de instalações específicas. O ABS foi o primeiro material utilizado na ME, e por consequência, o mais estudado. Em contrapartida, o PLA é um termoplástico recente, portanto existem características a serem investigadas acerca de suas propriedades (Dul; Fambri e Pegoretti, 2016; Pei, Shen e Watling, 2015; Tymrak; Kreiger e Pearce, 2014).

Ciente das deficiências da literatura em relação a trabalhos relevantes sobre as propriedades estruturais de peças em PLA impressas, este estudo investiga as propriedades mecânicas de objetos confeccionados com ME, analisando o uso do PLA e dois parâmetros de impressão. Para tal, será empregada uma abordagem experimental, visando determinar a resistência à tração dos corpos de prova confeccionados, com base na norma ASTM D638 de 2014. Os parâmetros a serem analisados são o percentual e o ângulo de preenchimento.

Para analisar estatisticamente a influência dos parâmetros, será utilizado o teste de Tukey nas médias das tensões últimas obtidas. O teste terá como objetivo, descobrir se o percentual e o ângulo de preenchimento exercem alguma influência nas características finais do objeto.

1. Desenvolvimento

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi empregado o método de revisão sistemática da literatura proposto por Bailey et al. (2007) e Viana, Formoso e Kalsaas (2012). A ferramenta empregada consiste em um mapeamento da literatura que estabelece uma estrutura para a busca sistêmica de periódicos, extração e análise de dados (Bailey et al., 2007). Ao final do processo de revisão, a partir da leitura dos artigos, foram evidenciadas duas vertentes principais: o processo de impressão 3D por extrusão de material e a caracterização dos polímeros a base de PLA.

A tecnologia de impressão por extrusão de material (ME-material extrusion) consiste em uma técnica de produção que confecciona o objeto a partir da adição sucessiva de material. Em suma, a ME efetua a fabricação do objeto por meio da formação de camadas sucessivas de material extrudado, comumente o ABS ou PLA, segundo a geometria do modelo (Ahn et al., 2002; Burn; Ta; Gogola, 2016; Volpato; Foggiatto; Schwarz, 2014; Christiyan; Chandrasekhar; Venkateswarlu, 2016; Alvarez, Lagos e Aizpun, 2016).

O material empregado na impressão, que inicialmente se encontra na forma de filamento em carretel, é extrudado através de um bocal altamente aquecido, de maneira a propiciar o derretimento do filamento e permitir a sua deposição sobre uma base. O bico extrusor é responsável por descrever ainda, movimentos lineares segundo o plano xy camada a camada, seguindo a geometria do objeto que está em construção (Onwubolu; Rayegani, 2014; Alvarez, Lagos e Aizpun, 2016).

As propriedades mecânicas das peças fabricadas por ME podem ser controladas por meio da variação dos parâmetros de processo, como a espessura da camada, orientação de impressão, número de contornos, temperatura de extrusão, velocidade de impressão, entre diversos outros. Nesse contexto, estudos têm sido realizados visando analisar os efeitos de variações nos parâmetros do processo de impressão sobre as propriedades gerais dos componentes impressos (Alvarez, Lagos e Aizpun, 2016; Levenhagen e Dadmun, 2017).

As propriedades mecânicas de componentes impressos em PLA por meio da técnica ME foram documentadas por Tymrak, Kreiger e Pearce (2014), Wittbrodt e Pearce (2015), Torres et al. (2016), Griffiths et al. (2016) e Bayraktar et al. (2016). Grandes partes dos trabalhos avaliaram a resistência à tração dos componentes conduzidos pela norma ASTM D638.

Ademais, os estudos abordaram parâmetros como espessura da camada, orientação de impressão, cor do material, ângulo e porcentagem de preenchimento, velocidade de impressão, temperatura de extrusão e número de contornos. No qual, os parâmetros ângulo de preenchimento, número de contornos, porcentagem de preenchimento e a cor do material mostram-se ser altamente significativos para a resistência à tração dos objetos impressos (Tymrak, Kreiger e Pearce, 2014; Wittbrodt e Pearce, 2015; Torres et al., 2016; Griffiths et al., 2016; Bayraktar et al., 2016).

Bayraktar et al. (2016) desenvolveu um modelo preditivo utilizando redes neurais artificiais (ARN). Em seu estudo, Bayraktar et al. (2016) verificou a resistência à tração dos parâmetros temperatura de extrusão, espessura da camada e o ângulo de preenchimento. Os resultados experimentais evidenciaram a eficiência do modelo ARN proposto além de verificar a influência dos parâmetros testados sobre as propriedades mecânicas das peças fabricadas.

Dichtl, Sippel e Krohns (2017) verificaram que as propriedades dielétricas do PLA impresso em ME são semelhantes aos do polímero ácido polilático amorfo, permitindo boas propriedades isolantes quando em temperaturas abaixo à de transição vítrea. O trabalho exprime ainda a aplicabilidade do PLA na fabricação de componentes eletrônicos a partir da manufatura aditiva.

Wu et al. (2017) investigou a influência dos parâmetros de processo no efeito de memória de forma de componentes impressos em PLA. Os parâmetros analisados foram: a espessura da camada, a temperatura de deformação e a de restauração e o ângulo de preenchimento. O estudo identificou que o parâmetro mais influente para o efeito de memória de forma é a temperatura de restauração. A maior proporção de restauração da forma foi de 98% e a maior taxa de recuperação foi de 2.036 mm/s, evidenciando uma potencial aplicabilidade do PLA impresso em 3D na forma de stents vasculares auto expansíveis.

A combinação entre materiais tem ganhado bastante espaço em aplicações, tendo em vista a melhoria de propriedades mecânicas desejadas. Algumas aplicações foram abordadas por Levenhagen e Dadmun (2017) que estudou a mistura de PLA de baixo peso molecular com o PLA comercial, Chang et al. (2015) que analisou a adição de nanopartículas de ferro (Fe_3O_4) ao PLA e também como Yu et al. (2016) que analisou os efeitos dos materiais grafeno e nanotubos de carbono em junção com o termoplástico PLA.

Verificou-se ainda, que as propriedades mecânicas das peças em PLA impressas não foram completamente documentadas, isto se deve principalmente a este termoplástico ser um material recente em aplicações na manufatura aditiva, em comparação ao ABS. Evidencia-se assim a necessidade de mais estudos que quantifiquem e qualifiquem as propriedades estruturais de objetos impressos utilizando o material PLA.

Apesar da existência de estudos que contribuam para uma melhor compreensão acerca das propriedades estruturais de peças em PLA impressas,

restam ainda incertezas sobre a influência dos parâmetros de processo nas características finais dos objetos confeccionados, necessitando de estudos adicionais. Dentre esses parâmetros destacam-se o percentual, ângulo e a forma de preenchimento e a interação entre eles. Buscando maiores conhecimentos sobre a influência do preenchimento na resistência mecânica de objetos confeccionados por ME, foram realizados ensaios experimentais de tração.

Autor	Material	Propriedades	Parâmetros Estudados
Tymrak, Kreiger e Pearce (2014)	PLA e ABS	Tração e o módulo de elasticidade	Espessura da camada e a orientação de impressão.
Wittbrodt e Pearce (2015)	PLA	Tração e percentuais de cristalinidade	Cor.
Yu et al. (2016)	PLA	Reológicas, térmicas, mecânicas (tração e flexão) e condutividade elétrica.	Aditivos no material (Grafeno e nanotubos de carbono - CNT).
Torres et al. (2016)	PLA	Tração e fratura	Espessura da camada, porcentagem e ângulo de preenchimento, temperatura de extrusão, velocidade e orientação de impressão.
Levenhagen e Dadmun (2017)	PLA	Tração	Combinação de PLA comercial mais PLA de baixo peso molecular.
Chang et al. (2015)	PLA	Tração e flexão	Adição de nano-partículas de óxido de ferro.
Dichtl, Sippel e Krohns (2017)	PLA	Dielétricas	O próprio material (amorfo e semicristalino).
		Medidas de desempenho (tração e módulo de	

Griffiths et al. (2016)		elasticidade); Medidas de eficiência (tempo de impressão, consumo de energia, peso da peça, peso dos fragmentos)	Porcentagem de preenchimento, número de contornos, espessura da camada e orientação da impressão.
Bayraktar et al. (2016)	PLA	Tração e superfície de fratura	Temperatura de extrusão, ângulo de preenchimento e espessura da camada.
Wu et al. (2017)	PLA	Efeito de memória de forma	Temperatura de deformação, temperatura de restauração, espessura da camada e ângulo de preenchimento.

Tabela 70. Resumo do Estado da Arte da Caracterização do PLA

Fonte: Próprio autor.

2. Metodologia

O estudo da resistência mecânica dos componentes fabricados pela técnica de impressão 3D por extrusão de material abrange a confecção de corpos de prova e a realização de testes experimentais. A geometria do modelo a ser testado é regida por normas de padronização como a ISO e a ASTM, tendo em vista a validação do estudo e desenhada no software *Sketchup*. No presente trabalho, empregou-se a norma ASTM-D638 (2014) que define os métodos de teste padrão para a análise das propriedades de tração de materiais plásticos.

O principal intuito desta pesquisa é realizar a caracterização do PLA, um dos materiais mais comumente empregados no processo de impressão 3D por extrusão de material. As especificações técnicas do filamento PLA utilizado são apresentadas na Tabela 71.

Díâmetro do Filamento	Temperatura de Fusão	Temperatura da Mesa	Cor
3 mm	190-220 °C	60-70 °C	Natural

Tabela 71. Especificações técnicas do filamento PLA

Fonte: Próprio autor.

Visando analisar mais consistentemente os efeitos da variação de preenchimento em componentes impressos em PLA pela técnica ME, optou-se por estudar a influência dos parâmetros percentual e ângulo de preenchimento. As Tabelas 72 e 73 exibem os valores adotados para cada parâmetro do processo.

Parâmetros	Valores
Porcentagem de Preenchimento	50% e 100%
Ângulo de Preenchimento	0° e 45°

Tabela 73: Parâmetros de impressão fixos.

Parâmetros	Valores
Altura da Camada	0.2 mm
Velocidade de Impressão	40 mm/s
Tipo de Preenchimento	Retilinear
Número de Perímetros	2

Tabela 72. Parâmetros de impressão variáveis

Fonte: Próprio autor.

Como pode ser verificado, a Tabela 72 expõe os dois fatores cujos quais serão estudados, juntamente com os seus respectivos níveis, admitidos para teste. Os níveis adotados para o fator percentual de preenchimento foram definidos com base em experiências anteriores no desenvolvimento de projetos no Núcleo de Tecnologia Assistiva (NENA). Já a Tabela 73 apresenta os valores mantidos fixos durante o procedimento de impressão.

Para a impressão dos corpos de prova foram empregadas duas impressoras 3D: a PrusaMendel e a One, ambas da 3D Machine. As máquinas são equipadas com um extrusor cujo bocal possui 0.4 mm de diâmetro. As temperaturas para a base de impressão e o extrusor foram respectivamente, 70° C e 190° C.

Para a análise, foram impressas 6 amostras para cada configuração, totalizando um conjunto de 24 amostras para teste, de acordo com os fatores investigados. As seis amostras de cada configuração foram impressas simultaneamente, objetivando propiciar as mesmas condições ambientais e operacionais às amostras.

Concluída a impressão, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos contendo sílica, buscando minimizar ou até mesmo evitar os níveis de umidade nos corpos impressos.

Os testes experimentais foram realizados com o apoio do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Goiás Regional Catalão. Para a análise da resistência à tração do material, foi utilizado o sistema de teste universal servo hidráulico WDW-300E, pertencente ao Laboratório de Estruturas.

O sistema de teste é equipado com um computador que permite a aquisição de dados e controle de deslocamento e carga aplicada. Ainda, as amostras impressas foram testadas à temperatura ambiente, com uma velocidade de teste de 5 mm/s e sua deformação foi mensurada manualmente por intermédio de um paquímetro. Utilizou-se essa ferramenta, visto que o objetivo do ensaio é obter a tensão última das amostras testadas de forma a avaliar o desempenho dos componentes impressos, não sendo necessário, portanto, outro instrumento de precisão robusto, tal como um elastômetro, para mensurar a deformação sofrida pelos corpos de prova durante o procedimento.

Para a realização dos ensaios foi preciso o desenvolvimento de um suporte, de forma a revestir o corpo de prova, pois a máquina de tração utilizada no procedimento experimental possui um sistema de travamento hidráulico que dificultava o engaste do corpo de prova polimérico, em razão de sua natureza sensível em comparação ao concreto e ao aço, materiais comumente ensaiados no equipamento em questão.

Uma análise estatística sobre a resistência à tração média do polímero PLA, considerando variações na porcentagem e no ângulo de preenchimento, é apresentada na Seção 3.

3. Resultados

Nessa seção são apresentadas as respostas obtidas após a execução dos ensaios de tração. Foram testadas as amostras com as seguintes configurações: percentual de preenchimento: 50% e 100%; ângulo de preenchimento: 0° e 45°; todas considerando o tipo de preenchimento retilinear.

As leituras oriundas de corpos de prova que apresentaram ruptura fora da região útil, independente da porcentagem de preenchimento, foram desconsideradas na análise. Os resultados consistentes obtidos são sumarizados na Tabela 74, a qual apresenta a tensão última média das amostras testadas. A representação gráfica dos dados listados na Tabela 74 é mostrada na Figura 111.

Preenchimento	50%	100%
0°	27,18201 MPa	37,68250 MPa
45°	24,49180 MPa	43,27708 MPa

Tabela 74. Resistência Média (MPa) dos componentes impressos em PLA com variação de preenchimento

Fonte: Próprio autor.

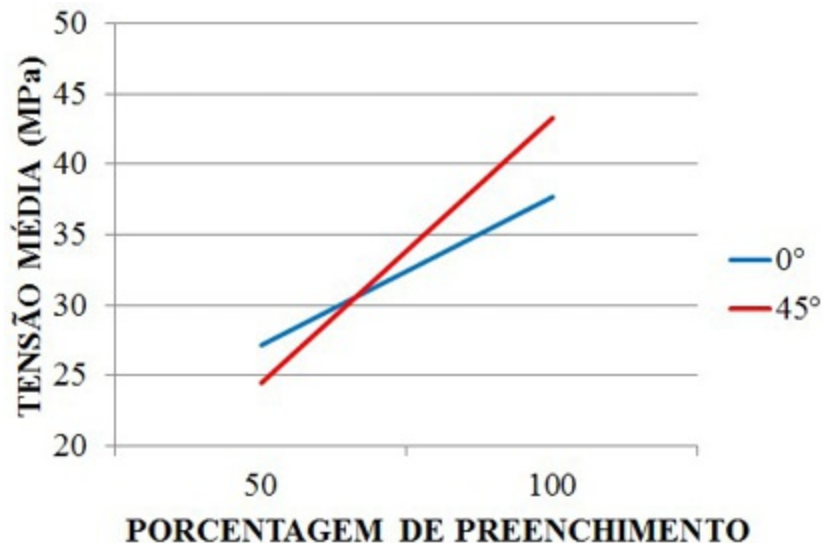


Figura 111. Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o PLA

Fonte: Os autores.

Observa-se que componentes impressos com 50% de preenchimento a 0°, exibem uma redução de 27.87% na resistência à tração em relação a peças totalmente preenchidas considerando o mesmo ângulo.

Em comparação as peças construídas considerando um ângulo de preenchimento de 45°, tais componentes acarretam uma redução de 37.19% na resistência à tração em relação a peças com preenchimento total, ao passo que exibem uma resistência mecânica 10.98% superior àquela apresentada por peças com 50% de preenchimento e ângulo de 45°.

Já os modelos de teste, impressos com 50% de preenchimento a 45° apresentam uma redução de 43.41% na resistência mecânica das peças confeccionadas considerando o mesmo ângulo de preenchimento e uma redução de 35% na resistência à tração de peças impressas com preenchimento completo à um ângulo de 0°.

Buscando avaliar, estatisticamente, a influência da variação de preenchimento no desempenho dos componentes impressos, foi aplicado o teste de Tukey (TSD) às médias da tensão última encontrada para cada

configuração. Esse teste possui a finalidade de comparar múltiplas médias e analisar toda e qualquer diferença significativa entre elas, realizando uma análise pareada de todos os resultados (Callegari-Jacques, 2003).

O teste de Tukey foi aplicado por intermédio do software estatístico R, considerando um nível de significância de 5%. Pretende-se por meio do teste TSD, identificar diferenças significativas entre as médias encontradas para a tensão última das amostras, de acordo com as diferentes configurações.

O intuito principal dessa aplicação é testar se o percentual e/ou ângulo de preenchimento exerce influência na resistência à tração dos componentes impressos, sendo consideradas as seguintes hipóteses:

- H_0 : todas as médias são iguais;
- H_1 : ao menos uma das médias é diferente.

A hipótese nula admite que ambas as configurações acarretam em um desempenho equivalente, ou seja, a variação na porcentagem e ângulo de preenchimento não interfere nas características finais do objeto impresso.

Em contrapartida, a hipótese H_1 implica que variações no preenchimento influenciam na resistência à tração das peças impressas indicando, conseqüentemente, que há uma diferença significativa entre as médias das tensões últimas.

O teste de Tukey, no software R, aplicado ao conjunto de dados, retorna os seguintes parâmetros:

- *diff*: corresponde à diferença entre as médias $\bar{y}_i$ e $\bar{y}_j$ do conjunto;
- *lwr* e *upr*: representam os limites inferior e superior do intervalo de confiança, isto é, eles indicam o menor e o maior intervalo o qual as médias pode atingir. Quando tais valores apresentam sinais iguais, as médias possuem diferença significativa;
- *p adj*: consiste no nível de significância entre as porcentagens de preenchimento. Do ponto de vista estatístico, se $p\ adj > \alpha$, rejeita-se a hipótese de nulidade e aceita-se a hipótese H_1 , logo, as médias apresentam

diferença significativa. Caso contrário, quando $p_{adj} > \alpha$, não há evidências suficientes para rejeitar H_0 , indicando que as médias têm 100.(p_{adj})% de chance de serem iguais.

Os fatores C1 e C2 correspondem, respectivamente, às médias das tensões últimas encontradas para as configurações com 50% e 100% de preenchimento, com impressão relativa ao ângulo de 0°. Já os fatores C3 e C4 referem-se respectivamente às médias das tensões últimas obtidas para as configurações com 50% e 100% de preenchimento para peças impressas com um ângulo de 45°.

A Figura 112 traz o teste de Tukey referente ao conjunto completo de todas as configurações testadas. O teste apontou diferença significativa entre todas as médias analisadas. Ao todo, foram realizadas seis comparações com base nas configurações estudadas. Observa-se que a hipótese H_0 é rejeitada em ambos os casos, isto é, as médias das tensões últimas obtidas são diferentes. A Figura 113 mostra a representação gráfica da resposta obtida por meio da aplicação do teste de Tukey.

```
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = dados$MediaT ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C2-C1 10.500483  8.994916 12.006049 0.0000000
C3-C1 -2.690210 -4.195777 -1.184643 0.0009267
C4-C1 16.095070 14.589503 17.600637 0.0000000
C3-C2 -13.190693 -14.696259 -11.685126 0.0000000
C4-C2  5.594588  4.089021  7.100154 0.0000006
C4-C3 18.785280 17.279713 20.290847 0.0000000
```

Figura 112. Resultados do Teste de Tukey - Comparação entre as tensões últimas médias

Fonte: Os autores.

O primeiro par de médias comparado (C2-C1, conforme Figura 112), avalia se há diferença significativa entre as médias das tensões últimas das

amostras obtidas com variações nas porcentagens de preenchimento, todavia admitindo um ângulo de preenchimento do objeto de 0° .

A comparação entre os fatores C2 e C1 exibiu um *diff* de 10.50048. Além disso, verifica-se que os limites inferior (*lwr*) e superior (*upr*) possuem o mesmo sinal. O nível de significância $p\ adj < \alpha$, consequentemente a hipótese H_0 é rejeitada e as médias não são iguais.

O segundo par de médias comparado (C3-C1), aferiu se há diferença significativa entre o desempenho proporcionado por componentes impressos com mesma porcentagem de preenchimento, 50%, porém preenchidos com ângulos diferentes, longitudinal e transversal.

A comparação entre os fatores C3 e C1 exibiu um *diff* de -2.69021. O valor de $p\ adj$ foi 0.0009267, ou seja, inferior à α , expondo dessa forma que há diferença significativa nos dados.

Os pares de médias C4-C1 e C3-C2 analisaram a possibilidade do desempenho mecânico dos componentes serem equivalentes. Contudo, os valores obtidos para o parâmetro $p\ adj$ em ambos os casos foram inferiores ao nível de significância considerado, rejeitando-se assim a hipótese H_0 .

A próxima análise avalia a diferença significativa das médias da tensão última para amostras impressas com 100% de preenchimento. Como pode ser visualizado, o par C4-C2 evidencia que há diferença significativa entre as médias, visto que o $p\ adj$ foi inferior a α . Ademais, os limites inferior (*lwr*) e superior (*upr*) possuem o mesmo sinal.

Por fim, o par C4-C3 investigou se há diferença significativa entre as médias das tensões últimas das amostras obtidas com variações nas porcentagens de preenchimento, porém admitindo um ângulo de preenchimento do objeto transversal, ou seja, 45° .

A sexta comparação (C4-C3) realizada apresenta uma diferença entre as médias de 18.78528 e $p\ adj$ igual a 0. Assim, a hipótese H_0 é rejeitada, isto é,

as médias entre as respostas obtidas para as configurações C3 e C4 não são iguais.

Verifica-se por meio deste estudo, que os parâmetros percentual e ângulo de preenchimento influenciam na resistência à tração dos componentes impressos pela técnica de impressão por extrusão de material.

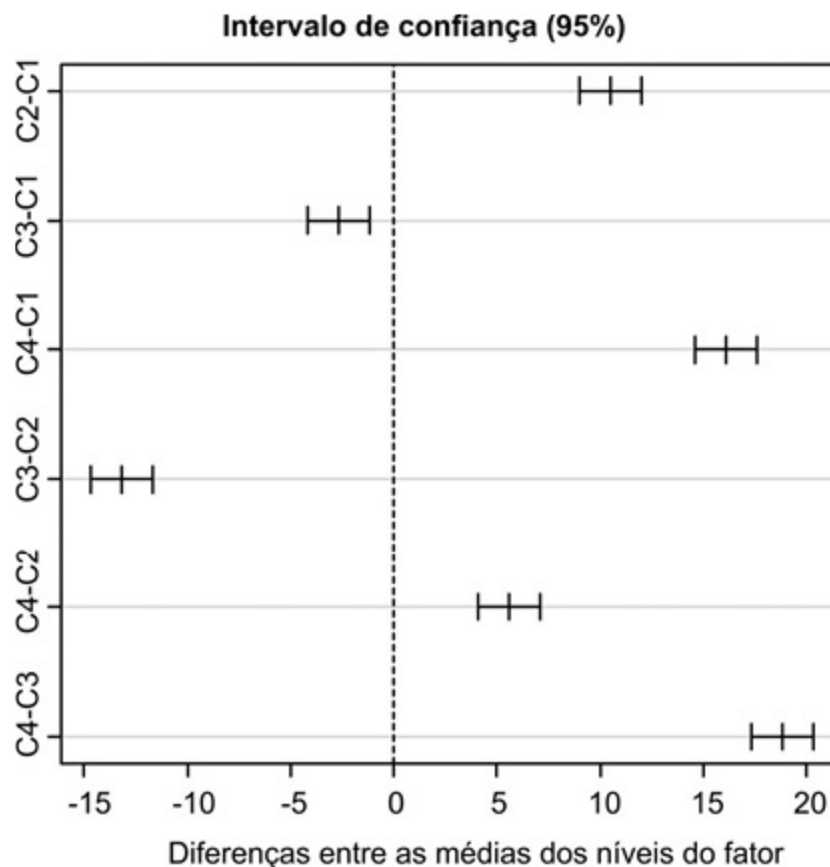


Figura 113. Gráfico do Teste de Tukey - Comparação entre as tensões últimas médias obtidas

Fonte: Os autores.

Conclusões

O estudo quantificou a resistência à tração de peças com menores taxas de preenchimento, visto que abordar componentes com preenchimento completo

é uma estratégia pouco utilizada na prática. Tal fato está relacionado com a tentativa de reduzir o peso do objeto e os custos com matéria-prima.

Por meio da realização desse estudo, foi possível constatar que a variabilidade do preenchimento interfere na propriedade de resistência à tração do componente impresso. Dessa forma, conclui-se que os parâmetros, ângulo e percentual de preenchimento são altamente influentes nas propriedades finais dos objetos impressos por ME.

A análise estatística mostrou diferença significativa entre as médias das tensões últimas obtidas para as configurações estudadas. O maior valor para a tensão última foi obtido para a amostra com preenchimento completo e ângulo de 45°. No entanto, para um preenchimento de 50% o maior valor da tensão última foi obtido para o ângulo de preenchimento de 0°.

De modo geral, a redução na densidade do componente para um mesmo padrão de preenchimento, pode acarretar em uma redução na resistência à tração do objeto de até 43%.

Por meio do estudo realizado, verifica-se que para objetos que não serão submetidos a esforços intensos, é possível minimizar a densidade do componente sem que seu desempenho seja comprometido. Dessa forma, reduz-se o consumo de material. Uma alternativa para compensar a redução de preenchimento é o incremento do número de contornos de forma a tornar o objeto menos frágil, e evitar danos quando este for manipulado inadequadamente.

Trabalhos futuros devem incluir um estudo mais aprofundado dos parâmetros, além de analisar maiores variações na forma e percentual de preenchimento, de modo a permitir a construção de um modelo capaz de prever o valor da tensão última do componente a partir dos valores adotados.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das instituições: CNPq (MCTI-SECIS-CNPq-84-2013; Bolsas de DT-2 de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora), FAPEG (Bolsa de Mestrado) e Pós-Graduação em Modelagem e Otimização na UFG / RC.

Referências

- AFROSE, Mst Fauujiya; et al. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of fdm-processed pla material. **Progress in Additive Manufacturing**, Springer, p. 1-8, 2015.
- AHN, Sung-Hoon; et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. **Rapid prototyping journal, MCB UP Ltd**, v. 8, n. 4, p. 248-257, 2002.
- ALVAREZ, Kenny L.; et al. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. **Ingeniería e Investigación**, v. 36, n. 3, p. 110-116, 2016.
- BAILEY, John; et al. Evidence relating to object-oriented software design: A survey. In: IEEE. Empirical Software Engineering and Measurement, 2007. First International Symposium on, p. 482-484, 2007.
- BAYRAKTAR, Ömer; et al. Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 28, n. 8, p. 1044-1051, 2017.
- BURN, Matthew B.; TA, Anderson; GOGOLA, Gloria R. Three-dimensional printing of prosthetic hands for children. **The Journal of hand surgery**, Elsevier, v. 41, n. 5, p. e103-e109, 2016.
- CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. Bioestatística: princípios e aplicações. São Paulo: Artmed, 2003.
- CHANG, Wei-Jen; et al. Development and testing of X-ray imaging-enhanced poly-L-lactide bone screws. **PloS one**, v. 10, n. 10, p. e0140354, 2015.
- CHRISTIYAN, K. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the mechanical properties of 3d printed abs composite. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 114, n. 1, 2016.

- DICHTL, Claudius; SIPPEL, Pit; KROHNS, Stephan. Dielectric Properties of 3D Printed Polylactic Acid. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.
- DUL, Sithiprumnea; FAMBRI, Luca; PEGORETTI, Alessandro. Fused deposition modelling with abs-graphene nanocomposites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 85, p. 181-191, 2016.
- GRIFFITHS, C. A.; et al. Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling. **Procedia CIRP**, v. 49, p. 28-32, 2016.
- HULL, C W. The birth of 3d printing. Research-Technology Management. **Taylor & Francis**, v. 58, n. 6, p. 25-30, 2015.
- LEE, B. H.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z. A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 169, n. 1, p. 54-61, 2005.
- LEVENHAGEN, Neiko P.; DADMUN, Mark D. Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3D printed polymeric samples. **Polymer**, v. 122, p. 232-241, 2017.
- LUNSFORD, Christopher; et al. Innovations With 3-Dimensional Printing in Physical Medicine and Rehabilitation: A Review of the Literature. **PM&R**, v. 8, n. 12, p. 1201-1212, 2016.
- ONWUBOLU, Godfrey C.; RAYEGANI, Farzad. Characterization and optimization of mechanical properties of abs parts manufactured by the fused deposition modelling process. **International Journal of Manufacturing Engineering, Hindawi Publishing Corporation**, v. 2014, 2014.
- OSTUZZI, Francesca; et al. + tuo project: low cost 3d printers as helpful tool for small communities with rheumatic diseases. **Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited**, v. 21, n. 5, p. 491-505, 2015.
- PEI, Eujin; SHEN, J; WATLING, Jennifer; SHEN, Jinsong. Direct 3d printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. **Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited**, v. 21, n. 5, p. 556-571, 2015.
- TORRADO, Angel R.; et al. Characterizing the effect of additives to abs on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material

- extrusion 3d printing. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 6, p. 16-29, 2015.
- TORRES, Jonathan; et al. An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 2, p. 387-404, 2016.
- TYMRAK, B.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. **Materials & Design**, Elsevier, v. 58, p. 242–246, 2014.
- VIANA, Daniela D.; FORMOSO, Carlos T.; KALSAAS, Bo Terje. Waste in construction: a systematic literature review on empirical studies. In: ANNUAL CONFERENCE OF INTERNATIONAL GROUP OF LEAN CONSTRUCTION. [s.l.: s.n.], 2012. v. 20.
- VOLPATO, Neri; FOGGIATTO, José Aguiomar; SCHWARZ, Daniel C. The influence of support base on fdm accuracy in z. **Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited**, v. 20, n. 3, p. 182-191, 2014.
- WITTBRODT, Ben; PEARCE, Joshua M. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 110-116, 2015.
- WU, Wenzheng; et al. Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. **Materials**, v. 10, n. 8, p. 970, 2017.
- YU, Wang Wang; et al. Incorporation of graphitic nano-filler and poly (lactic acid) in fused deposition modeling. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 15, 2017.

Notas

- 91.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG). Contato: stefanymayara7@gmail.com.
- 92.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Suporte Técnico em Educação à Distância do Curso de Matemática. Contato: brnomaia@gmail.com.

93. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Laboratório de Modelagem e Prototipagem 3D. Bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora do CNPq - Nível 2. Contato: mhstoppa@gmail.com.

Criação de uma ferramenta computacional para análise matricial de estruturas

*Jomar Macedo da Silva Filho*⁹⁴

*João Pedro Sena*⁹⁵

*Roberto Viegas Dutra*⁹⁶

*Wanderlei Malaquias Pereira Junior*⁹⁷

Resumo: O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma visão panorâmica, em caráter prático, do uso de ferramentas computacionais na análise estrutural. Para isso, foi proposto o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo de esforços em vigas e treliças planas. A metodologia baseia-se na análise matricial das tipologias supracitadas. Apresenta-se uma revisão sobre os principais conceitos envolvidos no método de análise, como algumas formulações pertinentes. Por fim o trabalho mostra o fluxograma de uma codificação genérica para a solução desses tipos de estruturas. Os resultados numéricos de alguns sistemas estruturais são comparados com softwares já consolidados no mercado, obtendo-se resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Análise estrutural, Método da rigidez direta, Análise matricial.

Introdução

O princípio da análise estrutural é baseado na idealização do comportamento físico de uma estrutura. Nesta etapa do projeto, são determinados os esforços internos e externos (cargas e reações de apoio) e suas tensões correspondentes, bem como os deslocamentos e suas correspondentes deformações na estrutura (Martha, 2010).

Em sistemas isostáticos, as equações de equilíbrio são suficientes para determinar os esforços em um modelo estrutural, uma vez que o número de vínculos externos se iguala ao número de condições de equilíbrio. Tais estruturas também são conhecidas como estaticamente determinadas. Alves Filho (2007), propõe uma sequência analítica de cálculo para a obtenção destes esforços: (a) Desenvolvimento de um modelo para análise que represente a estrutura; (b) Aplicação das equações de equilíbrio de modo a representar determinado comportamento físico; (c) Manipulação matemática para obtenção dos esforços, bem como o estudo da resistência interna da estrutura (tensões e deslocamentos); (d) Análise dos resultados, comparando a representatividade do modelo proposto com o real.

Todavia, em sistemas hiperestáticos há um número de vínculos externos excedentes em relação ao número de condições de equilíbrio, podendo também haver trechos internos da estrutura onde os esforços internos são indeterminados, mesmo se todas as reações nos vínculos forem conhecidas. Tem-se assim, um problema de sistema estaticamente indeterminado. No intuito de prover soluções, diferentes procedimentos generalizados foram desenvolvidos com o objetivo de analisar estruturas hiperestáticas de forma mais ágil, sendo que dentre eles destaca-se o método dos deslocamentos generalizado, também conhecido como o método da rigidez direta.

Devido à natureza matricial do problema, pode ser notado um crescimento no volume de operações matemáticas a serem realizadas a medida que as estruturas analisadas adquirem um maior grau de complexidade, tornando atrativa a ideia da utilização de ferramentas computacionais a fim de automatizar as rotinas de cálculo, o que por sua vez é a temática abordada no presente estudo.

1. Desenvolvimento

1.1 Método rigidez direta

O processo do método da rigidez direta compreende a transição do método dos deslocamentos clássico, de análise manual, para a análise com auxílio do computador seguindo um conjunto de instruções programadas Leet et al. (2010). Para o método da rigidez direta, inicialmente deduz-se a matriz de rigidez dos elementos componentes do sistema. Esse método de obtenção da matriz de rigidez local corresponde a forças e momentos que devem atuar nas extremidades de uma barra para equilibrá-la quando são impostos, isoladamente, deslocamentos ou rotações unitárias nas suas extremidades. Para maiores detalhes da dedução dos coeficientes deve-se consultar Martha (2010).

Sendo assim, a matriz de rigidez local K_m , de um membro de uma viga com três graus de liberdade por nó (sendo uma rotação e duas translações), com módulo de elasticidade E e inércia constante I_z e comprimento L será dada pela Equação 1. Já a matriz K_m do elemento de treliça plana é disposto na Equação 2, com módulo de elasticidade E e área de seção transversal A .

$$K_m = \begin{bmatrix} \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\ \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$K_m = \begin{bmatrix} \frac{EA_x}{L} & 0 & -\frac{EA_x}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA_x}{L} & 0 & \frac{EA_x}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

É possível perceber que a matriz de rigidez do elemento é compatível com o número de graus de liberdade existentes por elemento. Para as vigas a matriz do elemento é 6×6 pois existem três graus de liberdade por nó e cada elemento é formado por dois nós. No caso de treliças planas o elemento é

formado por dois nós e cada nó possui dois graus de liberdade, logo K_m terá o tamanho 4×4 .

Para determinar as propriedades da matriz de rigidez da estrutura completa, a partir da rigidez de cada elemento, as ações e deslocamentos vinculados a cada um destes elementos individuais devem ser relacionados em um sistema de referência comum sendo esse denominado de sistema global (Alves Filho, 2007).

O sistema de eixo local é definido no sentido do nó 1 para o nó 2, como mostrado na Figura 114, item (a). Em seguida, transforma-se o sistema de coordenadas locais em coordenadas globais como mostrado na Figura 114, item (b), a fim de compatibilizar cada elemento em um único sistema de coordenadas.

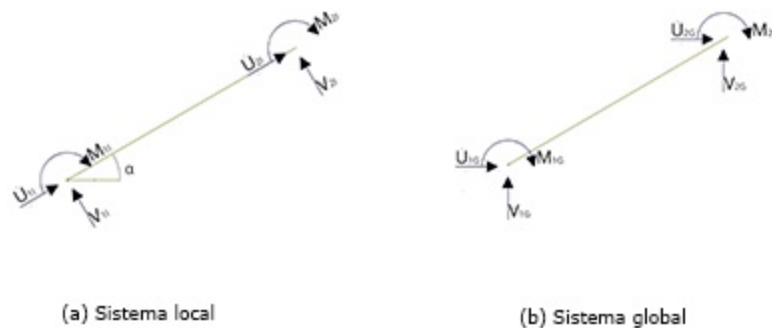


Figura 114. Transformação de um sistema local de elementos de viga para um sistema global

Fonte: Próprio autor.

Para que ocorra a transição da Figura 114, item (a) para o item (b) deve-se escrever uma matriz de transformação conforme apresentado na Equação 3 para treliças planas e Equação 4 para vigas. Lembrando que esse conceito é admitido na geometria analítica para translação e rotação de eixos coordenados.

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para que essa alteração de sistemas ocorra utiliza-se da matriz de transformação aplicando a mesma à matriz de rigidez do elemento K_M (conforme Equação 5).

$$K_M^G = T^T \cdot K_M \cdot T \quad (5)$$

Onde:

K_M^G – Matriz de rigidez do elemento no sistema global;

T – Matriz de transformação;

T^T – Matriz de transformação transposta;

K_M – Matriz de rigidez do elemento no sistema local.

Alves Filho (2007), afirma que a matriz de rigidez global K_j de uma estrutura nada mais é que a combinação da matriz de rigidez dos elementos que a compõe. Nela, é possível identificar todos os diferentes deslocamentos nodais possíveis, incluindo aqueles restringidos pelos apoios. Logo a construção da matriz de rigidez completa da estrutura será feita pelo entendimento da posição do grau de liberdade de cada elemento e sua correspondência na estrutura. Para a determinação do grau de liberdade da estrutura completa de vigas utiliza-se as equações de 6 a 8, já para treliças, utiliza-se as Equações 9 e 10:

$$U_i^u = 3.n - 2 \quad (6)$$

$$U_i^v = 3.n - 1 \quad (7)$$

$$U_i^\theta = 3.n \quad (8)$$

$$U_i^u = 2.n - 1 \quad (9)$$

$$U_i^v = 2.n \quad (10)$$

Onde:

u, v e θ – indicam as direções dos graus de liberdade, sendo u e v as translações e, x e y respectivamente e θ a rotação;

n – Número do nó analisado da estrutura.

Segundo Moreira (1977), a matriz de rigidez é uma matriz (n x n) capaz de transformar um vetor de deslocamentos no vetor das ações a eles associados. Assim, cada coeficiente de rigidez na matriz representado, pode ser definido como a i-ésima ação devida a um valor unitário do j-ésimo deslocamento, sendo os deslocamentos restantes iguais a zero. Deste modo se $i = j$, trata-se de um coeficiente de rigidez direto; se $i \neq j$, trata-se de um coeficiente de rigidez cruzado. (Gere e Weaver, 1987). A matriz de rigidez deve ser simétrica e passível de inversão para que todo o procedimento matemático seja válido.

Determinada a matriz de rigidez completa de uma estrutura, determina-se o vetor de carregamentos equivalentes da estrutura (A_c). No caso de uma viga, o vetor é dado pela Equação 11, onde F_{nodal} representa as cargas aplicadas nos nós da estrutura e $F_{distribuido}$ representa as cargas aplicadas entre os nós, ou seja, ao longo do elemento.

$$A_c = F_{nodal} + F_{distribuido} \quad (11)$$

As cargas nodais já estão posicionadas nos respectivos graus de liberdade do sistema local, já as cargas distribuídas dependem do tipo de carregamento atuante então necessitam de uma correção do sistema (passagem do local para global). Para exemplificar um vetor de cargas final, toma-se a Figura 115 juntamente com a Equação 12.

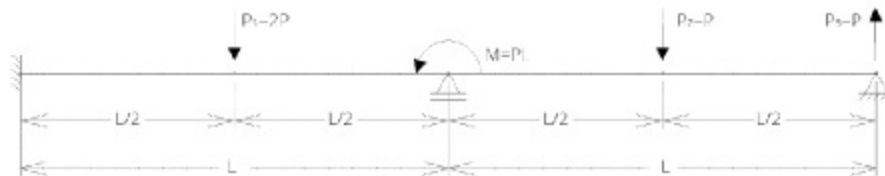


Figura 115. Cargas aplicadas à viga V2

Fonte: Próprio autor.

Para a estrutura em questão chega-se ao seguinte vetor de cargas totais do sistema estrutural.

$$A_c = \frac{9PL}{8}, \frac{PL}{8}, -P, -\frac{PL}{4}, -\frac{3P}{2}, -\frac{P}{2} \quad (12)$$

Para treliças existem apenas cargas nodais, logo a Equação 9 é resumida à Equação 13

$$A_c = F_{nodal} \quad (13)$$

De posse dos vetores de carga e matriz de rigidez Global, necessita-se obter os deslocamentos nodais (U) da estrutura completa. Para tanto aplica-se a Equação 14, obtida de manipulações da Lei de Hooke ($F=K.x$) em sua forma apresentada pela Equação 15.

$$A_c = Km.U \quad (14)$$

$$U = \frac{m}{K}(-1).Ac \quad (15)$$

1.2 Interpretação computacional de uma estrutura

Para automatização do processo do método da rigidez direta, deve-se entender a estrutura de forma computacional. Em um primeiro momento

descreve-se a estrutura de forma discreta, nomeando nós, elementos, apoios, elementos carregados, nós carregados e as propriedades dos materiais que envolvem a estrutura em análise. De forma a compreender esse entendimento computacional descreve-se a estrutura de viga da Figura 116.

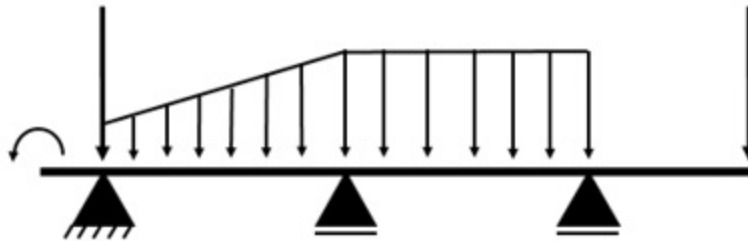


Figura 116. Viga contínua e seus carregamentos

Fonte: Próprio autor.

De modo geral, uma viga deverá conter todos os elementos de barra em linha reta, onde será considerado apenas os efeitos de momento fletor e cortante, podendo também conter: (a) cargas nodais e distribuídas ao longo dos elementos; (b) Existência de apoios do 1º, 2º e 3º gênero.

2. Metodologia / procedimentos utilizados

Essa pesquisa tem um caráter investigativo, pois explora os métodos de análise de uma estrutura, além de apresentar uma solução matricial para análise de esforços em um sistema estrutural.

Com o intuito de caracterizar essa pesquisa elaborou-se um software de análise estrutural capaz de solucionar o problema de forma matricial, com base no método da rigidez direta apresentado anteriormente na revisão bibliográfica desse trabalho. Para isso foi inicialmente elaborado um fluxograma que delimita o caminho a ser percorrido na rotina de resolução de uma análise matricial de estruturas planas observado na Figura 117. Posteriormente as rotinas foram programadas na linguagem Matlab.

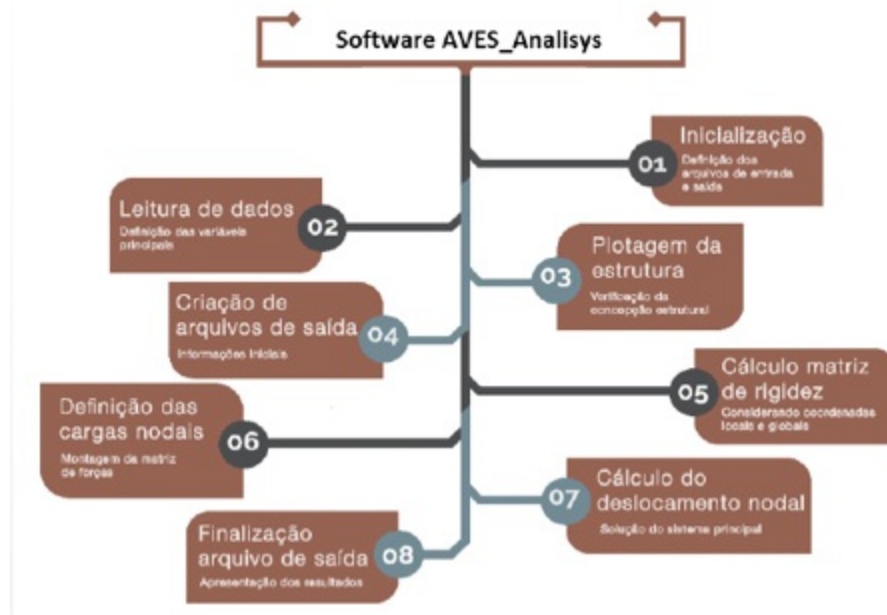


Figura 117. Fluxograma de um programa de análise matricial

Fonte: Próprio autor.

A validação dos resultados da rotina AVES_Analisys foi obtida através da sua aplicação nos sistemas estruturais apresentados próxima seção, comparando em seguida com os valores obtidos, para os mesmos sistemas, no software educacional Ftool.

3. Discussão e resultados

A partir dos conhecimentos relativos ao método dos deslocamentos, visto anteriormente, foi possível o desenvolvimento de um software de cálculo estrutura que abrange a obtenção dos deslocamentos e esforços finais em vigas, pórticos e treliças planas.

3.1 Desenvolvimento da rotina computacional generalizada

O programa, desenvolvido no software MATLAB, possui uma estruturação que permite ao usuário a entrada de dados a partir de um arquivo de texto com formato pré-estabelecido, resultando num arquivo de saída com informações sobre a estrutura e resultados nodais (deslocamentos e esforços).

A estrutura do programa principal busca uma programação mais direta, fazendo a chamada de funções externas, ou sub-rotinas, criadas para auxiliar e simplificar as operações gerais do processo, seguindo os mesmos princípios de modelagem orientada a objetos. Em cada etapa, buscou-se uma verificação de dados e de funcionamento do programa, avaliando possíveis erros de dados.

3.1.1 Inicialização

Definida pela função *Inicializacao()*, esta etapa consiste na inicialização do programa, limpando a tela de comandos, definindo o tipo de formato e atribuindo valores iniciais para as variáveis principais do programa (*status*, *ent*, *sai*, *tem*) e demandando ao usuário a entrada do nome do arquivo de entrada contendo os dados do problema. O status é validado com o valor ‘OK’, sendo este valor alterado para ‘erro’ quando o programa se depara com alguma incoerência na entrada de dados ou nos cálculos. As outras variáveis criam o arquivo temporário e o arquivo de saída.

3.1.2 Leitura de dados

Nesta etapa, outra função principal é chamada (*Leitura()*), que realiza toda a leitura de dados do arquivo de entrada. Inicia-se com a definição do tipo de estrutura, que define o valor das variáveis auxiliares utilizadas para diferenciação do cálculo para cada tipo. Após esta definição, a função inicia então a atribuição dos valores descritos no arquivo de entrada nas respectivas variáveis, fazendo sempre o teste da validade dos dados, evitando assim que o programa interrompa o processo. Os valores retornados são valores reais e matrizes contendo dados como coordenadas dos nós, forças aplicadas, entre outros.

3.1.3 Plotagem

A plotagem da estrutura não se caracteriza como etapa necessária para a solução do problema proposto. Esta etapa serve como validação da estrutura, auxiliando o usuário a verificar se a estrutura incorporada no programa corresponde à estrutura do problema a ser calculado. Após a conferência da estrutura, o usuário insere ‘SIM’ na linha de comando para que o programa então inicie os cálculos.

3.1.4 Criação arquivos de saída

Utilizando funções específicas, o programa então cria matrizes contendo os dados descritos, e então inicia com a criação de dois arquivos: um arquivo temporário e um arquivo de saída. Ambos os arquivos possuem texto contendo a formatação final do arquivo de saída (cabeçalho) e as informações iniciais da estrutura (nós, elementos, coordenadas, carregamentos, etc).

3.1.5 Cálculo da matriz de rigidez

É neste momento que o programa inicia os cálculos, primeiramente calculando a matriz de rigidez com o auxílio da função *RigidezEstrutura()* para obtenção da matriz de rigidez K final. Esta matriz é obtida a partir da obtenção da matriz de rigidez dos elementos, associadas à matriz de rotação que, por fim, forma a matriz de rigidez global, como visto na revisão bibliográfica.

3.1.6 Definição das cargas nodais

Colocação de cada carregamento estipulado no arquivo de entrada nos seus respectivos nós/elementos, segundo o tipo de estrutura sendo analisada. O tipo de estrutura implica na utilização do princípio de cargas equivalentes para elementos de pórticos e grelhas, sendo este processo excluído no cálculo de treliças.

3.1.7 Cálculo do deslocamento nodal

É realizado então o cálculo principal para obtenção dos esforços e deslocamento da estrutura, resolvendo o sistema principal com a matriz de deslocamentos como incógnitas do sistema. A solução do sistema linear necessita da utilização do princípio de matriz inversa, cálculo este que é realizado diretamente pelo programa MATLAB.

3.1.8 Finalização arquivo de saída

Por fim, como última etapa do programa, temos a finalização que consiste na colocação dos resultados no arquivo de saída, utilizando o modelo criado durante a criação do arquivo temporário. Além disto, uma função verifica o valor final da variável status, para que o programa possa informar a existência ou não de qualquer erro gerado durante a execução.

3.2 Solução de exemplos

Com o intuito de exemplificar o funcionamento do programa, resolver-se-á dois exemplos genéricos, sendo um problema de treliça metálica e um de viga de concreto armado. Ambos os problemas serão resolvidos utilizando também a ferramenta Ftool para se comprovar a confiabilidade dos resultados expostos.

3.2.1 Treliça metálica

A treliça metálica utilizada como exemplo de cálculo possui um vão total de 6 m, dividido em tramos de e com uma altura total de 2 m. O carregamento aplicado na estrutura corresponde a forças nodais de 5 kN aplicados nos nós superiores (nó 2, 4 e 6), e possui travamento horizontal e vertical como condições de apoio nos nós inferiores e de extremidade. A Figura 118 exemplifica a concepção estrutural utilizada.

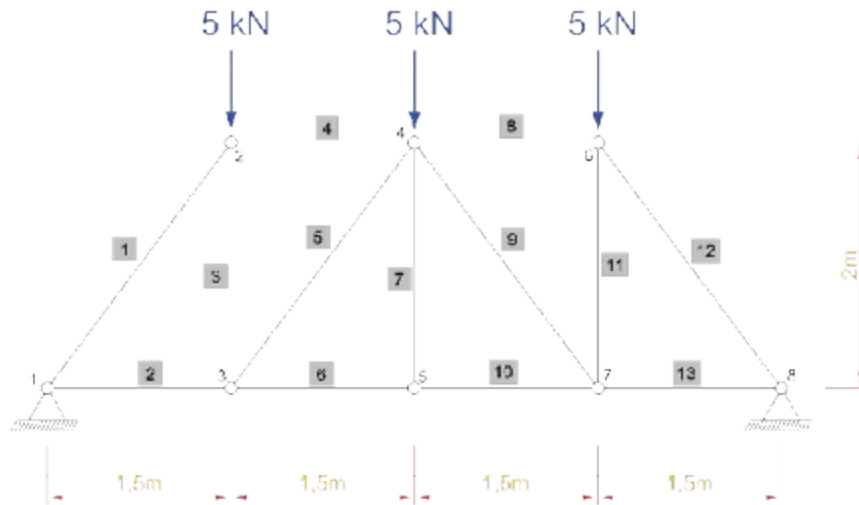


Figura 118. Modelo treliça metálica utilizada

Fonte: Próprio autor.

A seção utilizada para a estrutura será de perfil estrutural “U”, retirado de catálogo comercial com dimensões 200x75 mm e espessura de 3,35 mm. A partir destas dimensões, podemos chegar num valor de área de $11,36 \text{ cm}^2$, e pela escolha do aço como material, temos um valor do Módulo de elasticidade E igual a 205 GPa.

Os resultados de ambos os programas podem ser visualizados na Tabela 75 e na Tabela 76, que contém os valores das forças axiais para cada elemento e os valores dos deslocamentos nodais em y.

Elemento / Força Nodal (kN)													
Software	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AVES_Analisys	-9,4	-0,9	2,5	-5,6	-3,1	0,94	0	-5,6	-3,1	0,94	2,5	-9,4	-0,9
Ftool	-9,4	-0,9	2,5	-5,6	-3,1	0,9	0	-5,6	-3,1	0,9	2,5	-9,4	-0,9

Tabela 75. Resultados para os esforços calculados na treliça

Fonte: Próprio autor.

Software	Nó / Deslocamento δy (mm)							
AVES_Analisys	0	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0
Ftool	0	-0,15	-0,17	-0,22	-0,22	-0,15	-0,17	0

Tabela 76. Resultados para o deslocamento dos nós da treliça

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 75 pode ser observada uma boa congruência entre os dados obtidos com o software AVES_Analisys em relação ao software Ftool, havendo apenas uma pequena variação nos esforços calculados nos nós 6 e 10. Já na Tabela 76 podem ser observadas algumas variações na comparação entre os dois softwares. Esta variação pode ser creditada principalmente à formatação dos números empregada.

3.2.2 Viga de Concreto Armado

Optou-se também, para comparação de resultados, análise de uma viga contínua com 2 tramos de concreto armado, com dimensões 140x400 mm e $f_{ck}=25$ Mpa. A partir desse valor de f_{ck} , podemos consultar a tabela 8.1 da Norma NBR 6118 que indica o valor do Módulo de Elasticidade Secante, resultando num valor de $E_{sec}=28$ GPa. O carregamento consistirá num carregamento distribuído de valor igual a 10 kN, aplicado em toda a extensão da viga, conforme a Figura 119.

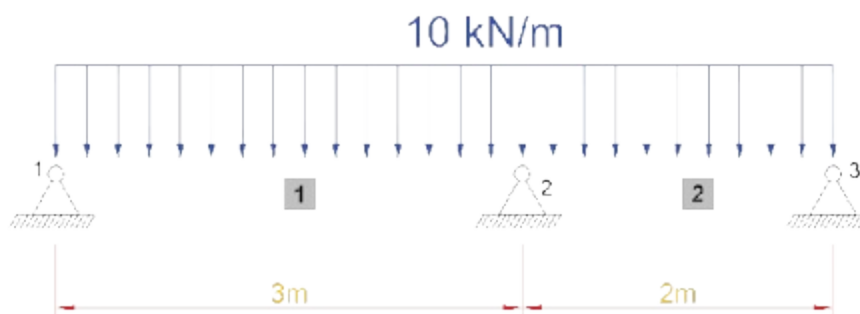


Figura 119. Esquema da viga analisada

Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos deslocamentos e rotações podem ser verificados, para ambos os programas, na Tabela 77.

Deslocamento (mm) e Rotação (rad)									
	Nó								
	1			2			3		
	δx	δy	θz	δx	δy	θz	δx	δy	θz
AVES	0	0	-0,329	0	0	0,1196	0	0	0,0199
Ftool	0	0	-0,329	0	0	0,1196	0	0	0,0199

Tabela 77. Resultados para rotação e deslocamento na viga de concreto armado

Fonte: Próprio autor.

Considerações finais

Pode ser observado que os resultados obtidos com a utilização do software AVES_Analisys, desenvolvido para os fins desta pesquisa, são bastante consistentes quando comparados com os apresentados pelo software Ftool, que por sua vez já é bastante consolidado no meio acadêmico, sendo amplamente utilizado como ferramenta auxiliar nos estudos que envolvem as disciplinas de análise estrutural.

Pode ser observada uma maior concordância dos resultados obtidos quando se leva em consideração a viga de concreto armado, contudo os resultados da treliça apresentam algumas variações possivelmente passíveis de correção em uma calibragem futura.

De posse dessa rotina generalizada pode-se ampliar os horizontes de implementação da mesma, utilizando-a na elaboração de softwares mais complexos que envolvam também o dimensionamento das peças, sejam elas de concreto, metal ou madeira.

A contribuição desta pesquisa está, portanto, no desenvolvimento de uma ferramenta a ser disponibilizada à comunidade acadêmica da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, tanto para uso nas disciplinas de estruturas, sejam elas do núcleo básico ou tecnológico, quanto para o aprimoramento da própria ferramenta através de trabalhos futuros.

Referências

- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos, a Base da Tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007.
- GERE, J. M.; WEAVER, W. Jr. **Análise de Estruturas Reticuladas**. Rio de Janeiro: Guanabara S.A., 1987.
- LEET, Kenneth; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne. **Fundamentos da Análise Estrutural**. 3. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2010.
- MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de Estruturas Conceitos e Métodos Básicos**. São Paulo: Elsevier, 2010.
- MOREIRA, Domicio Falcao. **Análise Matricial das Estruturas**. Rio de Janeiro: Ed. da USP, 1977.

Notas

- 94.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Discente do curso de Engenharia Civil. Contato: jomsf.engc@gmail.com.
- 95.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Discente do curso de Engenharia Civil. Contato: sena.joaopedro42@gmail.com.
- 96.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Discente do curso de Engenharia Civil. Contato: robertoviegasd@hotmail.com.
- 97.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Docente Departamento de Engenharia Civil. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.

Análise de incertezas de um sistema de aquisição de dados de corrente elétrica

Iago Ferreira Lima

Marco Paulo Guimarães

Sarah Cristina Azevedo

André Alves Resende

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise de incertezas de um sistema de aquisição de dados de corrente elétrica. O principal objetivo é proporcionar uma medida confiável e que traduza fielmente o valor medido e a sua incerteza. Para tanto, serão utilizados módulos que representam cada componente envolvido no processo de medição. Como aplicação prática foi desenvolvido um sistema composto por um transdutor de corrente, uma placa de aquisição de dados e um programa computacional para leitura e tratamento dos dados. O sistema de aquisição é utilizado para medição de corrente e tem diversas aplicações industriais como, por exemplo, monitoramento da corrente nos processos de soldagem, proporcionando ao operador dados que possam levar a melhores resultados práticos. Desta forma, com as medições realizadas, e identificada cada incerteza existente, os resultados foram obtidos chegando ao resultado da medição acrescida da incerteza expandida resultante do processo de medição, de acordo com recomendações internacionais.

Palavras-chave: Análise de Incertezas. Processo de medição. Transdutor de corrente. Sistemas de aquisição.

Introdução

O processo de medição é utilizado pelo homem desde os primórdios para quantificar e mensurar, com o objetivo de se organizar. Hoje em dia as medições continuam sendo realizadas, mas com um diferencial. Um fator básico que influencia os resultados e que, atualmente, está sendo levado em consideração é a incerteza decorrente do processo de medição utilizado.

Para chegar a um resultado que possa representar o mais próximo do valor real do que se deseja medir, vários fatores são considerados, uma vez que estes podem influenciar as medições. Dentre as fontes de incertezas, podem-se citar: a influência do meio ambiente, ruídos eletrostáticos e eletromagnéticos, incertezas individuais de cada componente do sistema de medição, erros de linearidade dos transdutores, dentre outros (Guimarães, 2013).

Dessa forma, pode-se estimar a incerteza da medição e as causas que podem levar a fontes de incertezas, indicando assim as variáveis de entrada para cada fonte de incerteza, determinando e quantificando cada uma delas. Depois desses valores conhecidos, são identificadas possíveis correlações entre as variáveis, e assim, chega-se ao resultado das incertezas combinadas e expandidas (Bazilio et al., 2012).

Este estudo é baseado na análise de incertezas de um sistema de aquisição de dados de corrente composto de um transdutor de corrente e uma placa de aquisição de dados da National Instruments.

A partir dos valores adquiridos, e da estimativa de incerteza de cada módulo do processo de medição, é possível estimar as faixas de erros que devem ser indicadas na medição.

Para atingir tal finalidade, são apresentadas as incertezas da medição de corrente e, desta forma, chega-se aos valores de incertezas combinadas e expandidas do processo. O método utilizado é baseado no *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* - ISO GUM (INMETRO, 2008).

Assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise de incertezas da aquisição de dados de um sistema de medições de corrente elétrica, proporcionando uma leitura e identificação desses valores mais próxima do valor verdadeiro da grandeza investigada.

1. Aquisição de dados

O ato de adquirir dados pode ser definido de maneira simples como medir informações. Muitas vezes essa medição é de natureza analógica, isto é, é um processo de medição correspondente a grandezas elétricas ou físicas contínuas, com o uso de um computador. Como exemplo de quantidades físicas tem-se: tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, entre outras (National Instruments, 2017).

Dessa forma, as grandezas são convertidas e transformadas em sinais elétricos através de sensores ou transdutores, e com o uso de ferramentas computacionais, essas informações podem ser armazenadas e tratadas após sua conversão para um formato digital, para que assim possam ser utilizadas para a realização de análise dessas informações em um computador. A figura 120 mostra de forma esquemática o processo de transformação das grandezas para sinal elétrico:

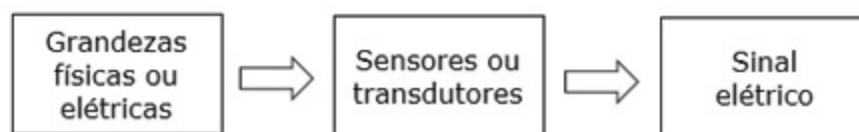


Figura 120. Processo de transformação das grandezas para sinal elétrico

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o rápido avanço tecnológico e a evolução da eletrônica, acompanhado do crescimento do mercado, a possibilidade de acesso à tecnologia e ferramentas modernas tem aumentado. O uso de microprocessadores possibilita uma redução do preço dos equipamentos, o que permite sua aplicação em equipamentos de leitura e armazenamento de

dados. A partir dessa coleta de dados de forma automatizada é possível eliminar erros entre eles os erros humanos na leitura dos sensores, erros de digitação, perdas de dados, sincronismo da leitura entre vários instrumentos e frequência de leitura com intervalos precisos (Vilela et al., 2001).

1.1 Transdutor de Corrente

O transdutor é um dispositivo que converte uma grandeza física em outra grandeza física de valor correspondente. Esse dispositivo tem o seu princípio de funcionamento baseado na geração de um potencial elétrico nos seus terminais de saída (Pallás-Areny e Webster, 1991).

O transdutor de corrente de efeito Hall é um dispositivo que permite emitir um sinal na saída proporcional ao valor da entrada, sendo assim, possível medir corrente contínua, alternada e formas mais complexas. O efeito Hall consiste no aparecimento de um campo elétrico em um condutor percorrido por uma corrente elétrica, quando o mesmo se encontra dentro de um campo magnético (Neis, 2000). A Figura 121 traz uma imagem de um transdutor de corrente.



Figura 121. Transdutor de corrente efeito hall HAS 400-S, marca LEM

Fonte: Digikey, 2017.

2. Metodologia

Visando atingir os objetivos propostos, dois caminhos podem ser utilizados para quantificar a incerteza. Quando o valor da incerteza é

encontrado por métodos estatísticos, esses procedimentos são caracterizados como análise de incertezas do “tipo A”. Nem sempre é possível a utilização dos procedimentos estatísticos para determinar a incerteza de um sistema de medição, dessa forma, quando utilizado procedimentos não estatísticos, essas incertezas são caracterizadas por meio de uma análise de incertezas do “tipo B” (Albertazzi, 2008). No estudo em questão, será realizado uma análise de incertezas do “tipo B”, sendo a análise das incertezas baseada nas informações disponíveis sobre os módulos do sistema, conforme classificação do Guia para a expressão de incerteza de medição (INMETRO, 2008). Assim, este capítulo visa descrever as montagens físicas do sistema de medições de corrente e mostrar cada componente do processo de medição junto à sua contribuição na incerteza combinada.

2.1 Montagem dos módulos do sistema

Para a montagem do sistema de aquisição de dados de corrente, foi necessária a utilização de um transdutor de corrente modelo HAS 400-S da marca LEM, que mede corrente na faixa de 0 a 400 A. O transdutor pode ser utilizado para a medição eletrônica de correntes DC, AC, pulsadas, com separação galvânica entre o circuito primário e o secundário do circuito, proporcionando uma medição sem interferências ao processo a ser medido. O transdutor é alimentado por uma tensão simétrica de ± 15 V DC. Na ligação do transdutor foi adicionado um resistor de $10\text{k}\Omega$ à saída para medição, conforme recomendação do fabricante.

Prosseguindo com a montagem do sistema de aquisição, a saída do transdutor é ligada à placa de aquisição de dados da National Instruments. Neste trabalho, foi utilizado na montagem um sistema modular de aquisição e controle de dados. Esse sistema modular é composto por um chassi onde se encaixam as placas de aquisição a serem utilizadas. O modelo empregado foi o NI cDAQ-9178, com um módulo de entradas analógicas e um bloco de

terminais com terminais de parafuso para montagem (módulos NI 9205 e bloco NI 9923, respectivamente). A Figura 122 mostra a imagem do módulo utilizado.

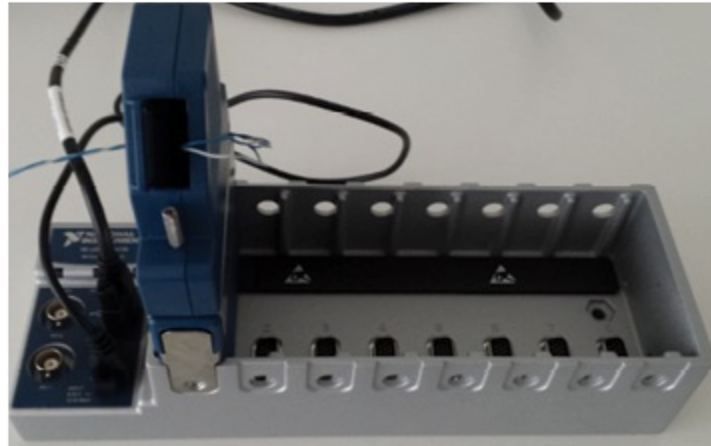


Figura 122. Módulo NI 9205 e Bloco NI 9923

Fonte: Elaborado pelos autores.

O módulo de entradas analógicas NI 9205 opera com 16 canais no modo diferencial de medições e 32 nos outros modos. Para os seus 32 canais, é possível obter uma taxa de amostragem máxima de 250 mil amostras por segundo. A resolução do conversor analógico digital é de 16 bits.

De posse da plataforma montada, e com a saída do transdutor já ligada a placa de aquisição de dados NI 9205 da National Instruments é possível visualizar através da Figura 123 o aparato experimental desenvolvido.



Figura 123. Sistema de medição desenvolvido

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, após a montagem de todos os componentes do aparato experimental, foi realizada a programação em um *software* de aquisição de dados para extrair os dados e posteriormente realizar o balanço de incerteza. Para ilustrar o programa desenvolvido para aquisição do sinal de corrente, o que não é objeto final desse trabalho e, por isso, foi omitido, foi montado um diagrama. A Figura 124 ilustra esse diagrama.

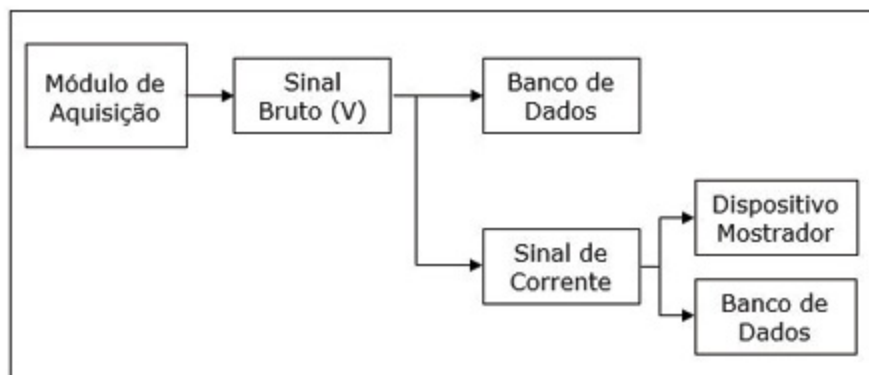


Figura 124. Diagrama de blocos referente ao programa criado para aquisição de dados

Fonte: Elaborado pelos autores.

O diagrama de blocos que deu origem a programação contém um valor multiplicador obtido na calibração do sensor, que permite transformar o sinal de tensão de saída do transdutor em valor de corrente de entrada do sistema. A partir do sinal enviado pelo transdutor de corrente e lido pela placa, tem-se o sinal bruto (em volts), representado pela tensão de entrada no canal da placa em que foi ligado o transdutor, que gera um gráfico de tensão versus tempo. Ao mesmo tempo, o programa converte o sinal de tensão em corrente.

3. Análise das incertezas

Para a realização da análise de incertezas das medições de corrente, fez-se necessária a utilização de módulos distintos para chegar ao resultado pretendido. Dessa forma, pela necessidade de análise de cada módulo separadamente, o estudo de incertezas será realizado conforme citado por Armando Albertazzi (2008) e de acordo com as recomendações do Inmetro (2008).

Para iniciar as análises, primeiramente foram identificados cada módulo do sistema de medição e as fontes de incertezas individuais de todos os módulos envolvidos no processo de medição. Tendo em vista que o sistema de medição será composto por um transdutor de corrente, cabos e uma placa

de aquisição de dados, cada um desses módulos apresentarão incertezas que influenciarão no resultado final das medições, conforme apresentação abaixo:

•**Transdutor de Corrente**

Faixa de medição: 0 a 400 A

Sensibilidade: 0,01 V/A

Correção: 0 V

Incerteza padrão: 0,10972402 V

•**Cabos**

Sensibilidade: 1 V/V

Correção: 0 V

Incerteza padrão: 5% (+ ou -)

•**Módulo de Aquisição**

Faixa de medição: -10 V a +10 V

Sensibilidade: 1 V/V

Correção: 0 V

Incerteza padrão: 0,00220798 V (+ ou -)

Desta forma, a Figura 125, mostra um diagrama que reflete uma avaliação de causas e efeitos das incertezas do sistema de medição, apresentando as incertezas que irão compor o processo.

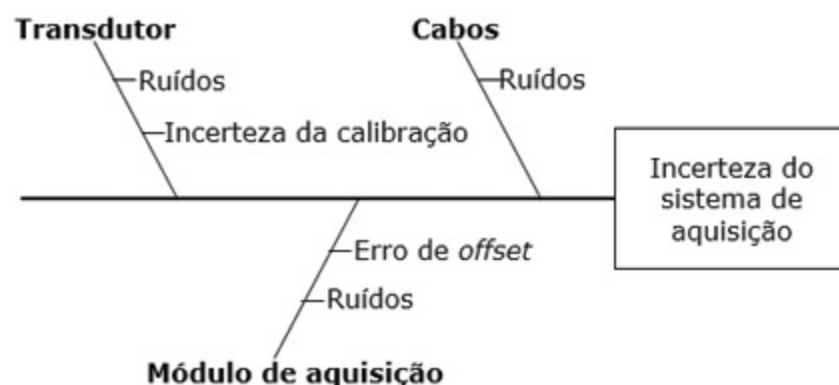
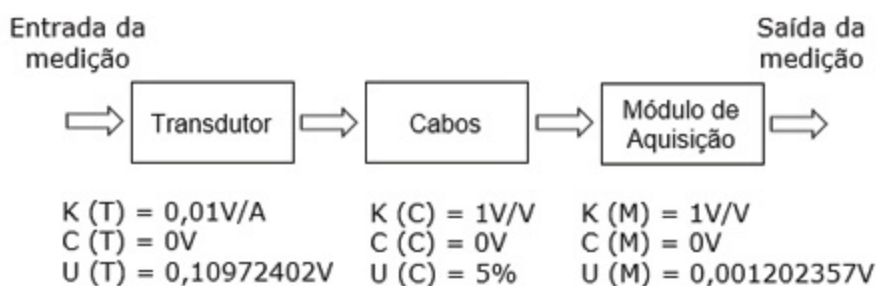


Figura 125. Diagrama de causas e efeitos para as incertezas consideradas

Fonte: Elaborado pelos autores.

Identificadas as incertezas, e já realizado o levantamento individual de cada módulo, parte-se posteriormente para combinar as informações de cada um deles e chegar a incerteza padrão combinada. Das fontes de incertezas citadas no diagrama de causas e efeitos das medições, algumas não irão compor os cálculos, uma vez que os seus valores se apresentam muito pequenos, tornando-os insignificantes em relação aos valores das medidas realizadas. A Figura 126 apresenta os módulos considerados na análise de incertezas do sistema de medição de corrente.



Saída da medição

Figura 126. Diagrama em blocos do sistema de medição

Fonte: Elaborado pelos autores.

De posse dessas informações, é possível determinar a sensibilidade combinada dos módulos do sistema, bem como a obtenção dos dados para prosseguir com a análise de incertezas.

As incertezas expandidas de cada módulo podem ser obtidas de maneiras distintas, sendo que a incerteza do transdutor foi obtida através de manuais técnicos fornecidos pelo fabricante. Esses dados já contemplam as incertezas de calibração, ruídos e não linearidades do transdutor.

No que se refere à incerteza dos cabos utilizados, os valores de interferências serão desconsiderados por se apresentarem insignificantes quando cuidados, como um correto aterramento, são tomados. As incertezas referentes aos ruídos nos cabos são aconselhadas por Lax (2012) como sendo um valor de 5% para cabos normais sem muitos cuidados com as conexões.

Sendo esse o nosso caso, esse valor será atribuído a incerteza do módulo do cabo.

As incertezas referentes à placa de aquisição foram utilizadas sob orientação do fabricante, conforme mostra a Tabela 78.

Entrada (V)	Ganho (ppm)	Offset (ppm)	INL* (ppm)	Ruído (ppm)	Incerteza Absoluta (V)	Incerteza Relativa (%)
0	215	40	76	4,082	2,72825E-05	Infinito
0,0001	215	40	76	4,082	2,73035E-05	27,304
0,001	215	40	76	4,082	2,74975E-05	2,750
0,01	215	40	76	4,082	2,94325E-05	0,294
0,1	215	40	76	4,082	4,87825E-05	0,049
0,2	215	40	76	4,082	7,02825E-05	0,035
0,5	155	25	76	10,614	0,000189114	0,038
1	155	25	76	10,614	0,000266614	0,027
5	135	20	76	47,357	0,001202357	0,024
10	115	20	76	97,980	0,00220798	0,022

Tabela 78. Incertezas do módulo de aquisição NI cDAQ-9205

Fonte: Adaptado de National (2008).

Prosseguindo com a análise, e de posse da incerteza padrão relativa de cada módulo, é possível calcular a incerteza padrão relativa combinada do sistema de medição expresso, uma vez que o Guia para a expressão de incerteza de medição (INMETRO, 2008) recomenda o tratamento da mesma forma para todas as incertezas padrão para o cálculo da incerteza combinada. Ainda, com esses valores é possível calcular a incerteza expandida e assim chegar ao resultado da medição. Para chegar ao resultado da medição foi criada a Tabela 79, que contém os dados do ensaio e da análise no que tange ao balanço de incertezas, e traz a sensibilidade combinada, a correção combinada e a incerteza combinada.

DADOS DO SISTEMA				Saída do SM: 0,364551 V (aprox. 37A)			
Transdutor de Corrente (T)		Cabos (C)			Módulo de Aquisição (M)		
Medição:0 a 400 A		Sensibilidade:	1 V/V		Medição: -10V a +10V		
Sensibilidade:	0,01 V/A	Correção:	0 V		Sensibilidade: -1 V/V		
Correção:	0 V	Incerteza:	5% (±)		Correção:0 V		
Incerteza:	0,10972402 V				Incerteza: 0,001202357 V (±)		
Entrada da medição		Saída da medição					
E (T)	36,57 A	S(T)			0,36455 V		
		S(C)			0,36455 V		
		S(M)			0,36455 V		
Correção relativa		Incertezas padrão relativas					
Cr(T)	0 V	Fonte	Incerteza	Distrib.	Divisor	Contrib.	Graus
Cr(C)	0 V	ur(T)	0,10972402 V	Normal	2	0,0548621	Infinito
Cr(M)	0 V	ur(C)	0,05000000 V	Retang.	1,73	0,0289017	Infinito
		ur(M)	0,00120236 V	Retang.	1,73	0,0006950	Infinito
Correlação relativa combinada			Incerteza padrão relativa combinada do SM				
Cr(SM)		0V	ur(SM)		0,06201325 V		
C(E)		0V	u(E)		2,26782451 A		
Incerteza expandida			Resultado da medição				
vef	infinito		RM = (I + C ± U95%) A				
U(E)	4,53564903 A		RM = (36,57 + 0 ± 4,54) A				
U(E)%	12,40%		RM = (36,57 ± 4,54) A				

Tabela 79. Planilha com o balanço de incertezas do sistema de medição

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. Discussão e resultados

De posse dos resultados encontrados nas medições, é possível verificar quais os blocos desse sistema que mais afetam a incerteza da medição, sendo que não foi considerado nenhum erro sistemático a se compensar devido à ausência dos mesmos.

A Figura 127 mostra os valores de tensão (valores brutos), antes do tratamento matemático no programa de aquisição de dados.

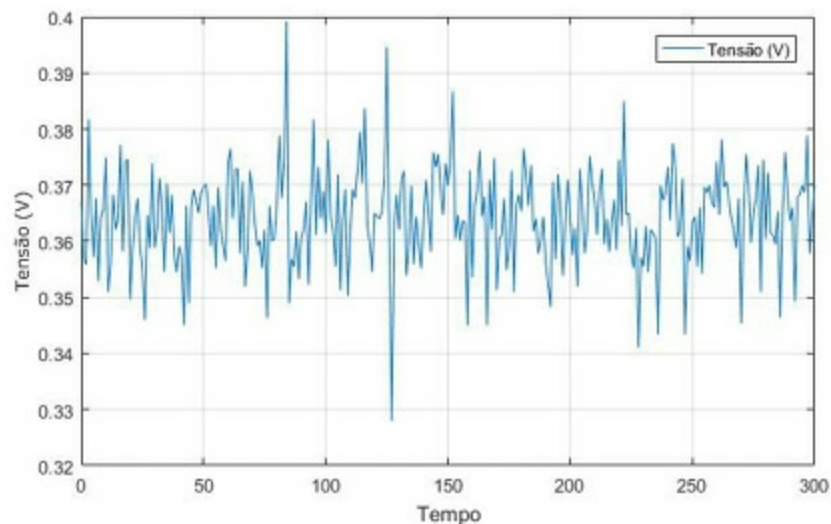


Figura 127. Gráfico tensão *versus* tempo

Fonte: Elaborado pelos autores.

De posse das informações emitidas pelo transdutor, esses valores são convertidos para níveis de corrente, chegando ao valor da corrente no momento da medição, cujo valor médio medido foi 36,57 A. A Figura 128 mostra os valores medidos após a conversão de sinal do transdutor para corrente.

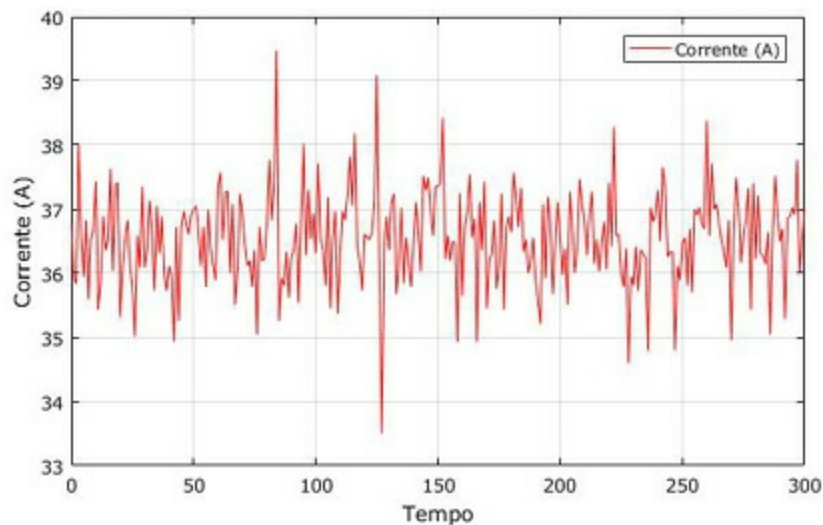


Figura 128. Gráfico corrente *versus* tempo

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nos valores encontrados, e com a análise de incertezas de cada módulo, é possível avaliar a incerteza da medida realizada pelo sistema de medição, uma vez que torna mais fácil visualizar qual módulo oferece maior influência na incerteza do sistema. Dessa forma, o transdutor de corrente é o módulo que tem maior influência no resultado final, uma vez que a incerteza do transdutor equivale a aproximadamente 68,18% da incerteza total do sistema, seguido pela incerteza dos cabos e da placa de aquisição, que equivalem a 31,07% e 0,02% da incerteza do sistema, respectivamente. O Gráfico 1 mostra a influência de cada fonte de incerteza no resultado da medição.

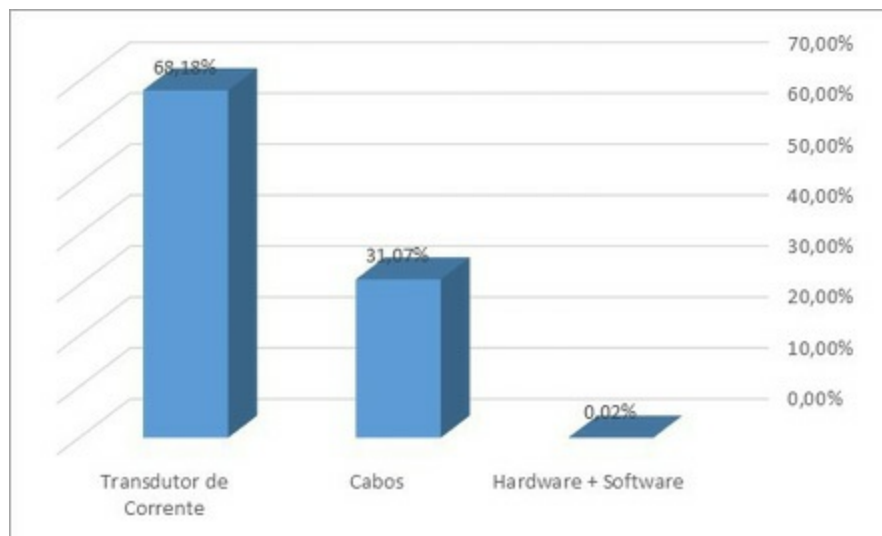


Figura 129. Gráfico da participação percentual das incertezas

Fonte: Elaborado pelos autores.

Diante disso, o resultado final da medição, considerando a incerteza de cada um dos módulos analisados será de $(36,57 \pm 4,54)$ A, ou seja, o resultado real da corrente no momento da solda, seguindo esses parâmetros, estará contido entre 32,03 A e 41,11 A (com 95% de probabilidade).

Considerações finais

Com a realização desse trabalho foi possível avaliar o sistema de medição de corrente de solda, analisando os parâmetros de cada módulo que o compõe, e, assim, demonstrar ao final o resultado da medição com a sua incerteza expandida. Mediante os resultados apresentados ficou perceptível que os limites inferiores e superiores do resultado final da medição foram expressos em valores de $-4,54$ A e $+4,54$ A, representando uma incerteza expandida em valores percentuais de pouco mais de 12%.

O monitoramento da corrente em processos, como o de solda, pode ser feito utilizando o sistema de medições descrito, uma vez que ele vai traduzir a realidade, dentro de uma faixa previsível de incerteza.

Como recomendação para diminuir os valores da incerteza, pode-se citar a troca do transdutor de corrente, uma vez que esse módulo apresentou uma incerteza padrão relativa de 68,18% da incerteza total da medição, o que corresponde a uma parcela considerável no resultado final. Ainda assim, recomenda-se a utilização de cabos para baixo ruídos, que pode diminuir a incerteza padrão do bloco de 5% para algo em torno de 0,5%. É interessante ressaltar que no sistema, da forma que se encontra, a troca da placa de aquisição de dados não evidenciará diminuição relevantes na incerteza expandida do processo de medição, uma vez que a sua participação na incerteza total do sistema foi baixa.

De forma geral, a representação do sistema de medição de corrente através de blocos se mostrou satisfatória para o processo de análise da incerteza de medição, e que, sendo realizados ajustes referentes aos materiais utilizados, a incerteza pode ser diminuída, melhorando consideravelmente o resultado final da medição.

Referências

- ALBERTAZZI, Armando. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.
- BAZILIO, Fabio Silvestre; et al. Estimativa da incerteza de medição: estudo de caso no ensaio de migração de ϵ -caprolactama com determinação por CG-DIC. **Quim. Nova**, v. 35, n. 8, p. 1664-1667, 2012. Disponível em: <<http://bit.ly/2QDZB5L>>. Acesso em: 16 jul. 2017.
- DIGIKEY CORPORATION. **Transducers**. Disponível em: <<http://bit.ly/2QCQoL6>>. Acesso em: 16 jul. 2017.
- GUIMARÃES, Marco Paulo. Controle semiativo de vibrações por força de controle não linear. 2013. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília.
- INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Avaliação de dados de medição**: Guia para a expressão de incerteza de medição. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.

- LAX, R. **Analysing the Vibration Controller Closed Loop Chain**. Disponível em: <<http://bit.ly/2xq9BIb>>. Acesso em: 21 dez. 2012.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é aquisição de dados?** Disponível em: <<http://bit.ly/2OudW3h>>. Acesso em: 04 out. 2017.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 9205: operating instructions and specifications**. Austin: Ed. Própria, 2008.
- NEIS, Paulo. **Transdutores de Corrente por efeito Hall**. Instrumentação Eletrônica. Universidade Federal do Paraná. 2000. Disponível em: <<http://bit.ly/2NojLDa>>. Acesso em: 06 out. 2017.
- PALLÁS-ARENY, Ramon; WEBSTER, John. G. **Sensors and signal conditioning**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.
- VILELA, Luis, A. A.; et al. Sistema para aquisição de dados de pressão e vazão usando o microcomputador. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v. 1, n. 2, p. 25-30, dez. 2001. Disponível em: <<http://bit.ly/2QGAi3l>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

28.

Jogo de quebra-cabeça para crianças com deficiência física nos membros superiores utilizando o dispositivo vestível myo

*Flávia Gonçalves Fernandes*⁹⁸

*Alexandre Cardoso*⁹⁹

*Renato de Aquino Lopes*¹⁰⁰

Resumo: Este trabalho apresenta uma estratégia para suportar interação humano-computador de crianças com deficiência nos membros superiores por meio de dispositivo vestível, com o objetivo de melhorar o acesso aos jogos digitais ao público-alvo. Para o seu desenvolvimento, foi utilizado o dispositivo vestível *Myo* para controlar um jogo de quebra-cabeça como meio de prover a interação entre o indivíduo e o jogo. Neste contexto, o jogo é controlado pelos movimentos do membro superior do usuário, que apresenta a deficiência, por meio do *Myo*. Para validação da pesquisa, o jogo desenvolvido foi disponibilizado para indivíduos com deficiência física nos membros superiores, na faixa etária entre oito e quinze anos, da Associação de Assistência à Criança Deficiente (AACD). Logo, observou-se que os participantes da pesquisa conseguiram jogar utilizando o membro com deficiência com apoio do *Myo* e sentiram-se mais motivados a jogar, tornando o processo de promoção da consciência corporal mais interativo.

Palavras-chave: Deficiência Física. Jogos Digitais. Membros Superiores.

Introdução

Os jogos digitais deixaram de ser vistos como uma forma de entretenimento prejudicial à saúde. Eles tornaram-se uma ferramenta importante para melhorar o tratamento dos pacientes, que vão desde aqueles que estão atravessando uma grave enfermidade, como o câncer, por exemplo, até os que demandam procedimentos mais leves, como a fisioterapia. Contudo, há pessoas que possuem deficiência física e possuem dificuldade em utilizar jogos digitais.

Assim, a utilização do jogo digital pode tornar-se uma alternativa em proporcionar maior motivação nas brincadeiras por meio de desafios com técnicas virtuais, trabalhando conceitos que podem auxiliar na cognição, nos aspectos emocionais e físicos dos pacientes, no favorecimento dos movimentos do membro afetado, lazer, socialização e convivência com outras crianças.

Além disso, a promoção da consciência corporal de forma virtual por meio de jogos visa simular situações reais; também se percebe que o uso dela melhora a funcionalidade dos membros acometidos e o leva a retomar as atividades nas áreas de desempenho ocupacional (Grande; Galvão; Gondim, 2011).

Nesta perspectiva, existem trabalhos, tais como PhysioPlay (Santos, 2013) e MoVER – Movement in Virtual Environment for Rehabilitation (Sousa Junior, 2013), que comprovam a eficiência do uso de jogos na motivação de pacientes em continuar o tratamento de fisioterapia dos membros superiores. Ambos são jogos sérios que simulam movimentos fisioterapêuticos por meio de desafios para a realização de tarefas virtuais com o uso do corpo humano, demonstrando a possibilidade de tratamento remoto para a promoção da consciência corporal e o seu baixo custo.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar o uso de um jogo de quebra-cabeça, utilizando o dispositivo vestível Myo como

forma de interação, para prover uma melhor acessibilidade às pessoas que possuam algum tipo de deficiência nos membros superiores.

A aplicação foi executada em pacientes da Associação de Assistência à Criança Deficiente (AACD) após aprovação do projeto pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Universidade Federal de Uberlândia (Anexo A) e da Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CONEP), com número do parecer: 1.790.475, e, conforme pode ser visto no Anexo B.

Este trabalho encontra-se organizado e estruturado nas seguintes seções:

A seção 1 apresenta o desenvolvimento do trabalho, ou seja, detalhes da implementação da aplicação e uso do Myo como dispositivo de controle do jogo, e as demais configurações necessárias. Além disso, exibe o layout do jogo e apresenta os princípios básicos de funcionamento do sistema.

Na seção 2, foi abordado sobre os métodos, ferramentas e tecnologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho, destacando as principais características do dispositivo vestível Myo utilizado como instrumento de interação neste trabalho.

Na seção 3, são apresentados os testes aplicados com o público-alvo da pesquisa: crianças e adolescentes com deficiência física nos membros superiores. Também mostra uma avaliação da aplicação pelos pacientes e uma análise gráfica referente aos resultados obtidos.

A seção 4 corresponde às considerações finais, concluindo a pesquisa sobre o uso de jogos digitais por pessoas com deficiência nos membros superiores utilizando o Myo como meio de interação. E ainda, as conclusões obtidas a partir dos testes aplicados nos pacientes utilizando jogos controlados pelo dispositivo vestível Myo, além de propostas de trabalhos futuros para melhor aplicação do tema.

1. Desenvolvimento

Primeiramente, foi realizado um estudo sobre o dispositivo vestível *Myo* com a finalidade de aprender sobre os seus comandos de execução, suas características, seus princípios de funcionamento.

O dispositivo vestível *Myo* é um bracelete capaz de controlar aplicações por meio de gestos e interagir com computadores e outros meios digitais similares, reconhecendo impulsos elétricos nos músculos do usuário. Ele é um modelo comercializado livremente, não só para pesquisadores, mas também para consumidores comuns que desejam utilizá-lo em jogos de computador ou para controle de outras aplicações (Myo, 2016).



Figura 130. Dispositivo vestível *Myo*

Fonte: Autoria própria.

Por ser um método não-invasivo de eletromiografia, o dispositivo *Myo* não provoca efeitos colaterais ao participante da pesquisa, visto que é um acessório similar a um relógio ou pulseira, o qual não causa alergia, dor, irritação na pele, calosidades, nem qualquer outro dano ou prejuízo físico. Ele capta os gestos do participante e, em seguida, transmite para o computador, o qual reconhece os movimentos e executa as atividades durante a execução dos jogos.

Os símbolos apresentados na Figura 131 são os principais gestos realizados pelo usuário durante a execução de aplicações controladas pelo *Myo*, conforme padrão do dispositivo vestível.



Figura 131. Gestos executados pelo usuário

Fonte: Autoria própria.

Um jogo de quebra-cabeça foi escolhido, porque este tipo de jogo pode auxiliar tanto na promoção da consciência corporal dos pacientes quanto nos aspectos cognitivos, uma vez que exercita o raciocínio lógico dos usuários, segundo informações obtidas com os profissionais da AACD.

Nessa perspectiva, foram realizados vários testes para entender o funcionamento do bracelete e dos *plugins* disponibilizados para *download*, com a finalidade de conhecer as várias possibilidades do que se pode fazer com o *Myo*.

No jogo de quebra-cabeça apresentado, o gesto *Double Tap* é utilizado para iniciar o jogo. Os gestos *Wave Left* e *Wave Right* são utilizados para selecionar as peças do quebra-cabeça para a esquerda e para a direita, respectivamente. Para mover as peças até o grid, utiliza-se o gesto *Fist*, e para encaixar as peças do quebra-cabeça no grid, utiliza-se o gesto *Fingers Spread*.

Para o desenvolvimento do jogo, foi utilizada a *game engine Unity 3D*, por oferecer diversos recursos de computação gráfica necessários para implementação do projeto, além de possuir *plugin* de compatibilidade com o dispositivo vestível *Myo*. Também foi utilizada a linguagem de programação C#, por ser de fácil compatibilidade com o *software Unity 3D*.

Após esses procedimentos, pode-se desbloquear o *software*, colocar o *Myo* no braço do usuário, efetuar a calibração do dispositivo e usar os movimentos do braço da pessoa, ao invés de *mouse* e teclado.

Dessa forma, foram substituídos os comandos que utilizam o mouse e teclado no jogo por gestos do usuário, para que o sistema seja usado com o dispositivo vestível *Myo*.

No menu inicial do “Quebra-cabeça com *Myo*”, há três opções de níveis do jogo: Iniciante, Intermediário e Avançado.

Ao selecionar o nível “Iniciante”, é exibido o jogo de quebra-cabeça 2 x 2, ou seja, com quatro peças, conforme pode ser visto na Figura 132.



Figura 132. Tela inicial do Nível Iniciante

Fonte: Autoria própria.

As peças do jogo ficam do lado esquerdo da tela. Para arrastar as peças para o grid do quebra-cabeça, é preciso fazer gestos com o braço que está utilizando o dispositivo vestível *Myo* até concluir o nível atual do jogo.

Após a conclusão do nível do quebra-cabeça, é exibida a mensagem “Nível Concluído” juntamente com a pontuação e o número de tentativas erradas do usuário durante o jogo. Há também a opção de retornar ao menu inicial para selecionar outro nível do jogo.

Ao escolher o nível “Intermediário”, é apresentado o jogo de quebra-cabeça 3 x 3, isto é, com nove peças. A Figura 133 apresenta a Tela inicial do Nível Intermediário, em que o jogo está em resolução, uma vez que algumas peças já foram inseridas no grid do jogo.



Figura 133. Nível Intermediário do jogo em resolução

Fonte: Autoria própria.

A Figura 134 apresenta o nível “Avançado” do jogo concluído.

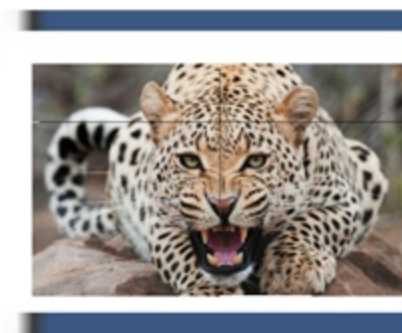


Figura 134. Nível Avançado concluído

Fonte: Autoria própria.

2. Metodologia

Primeiramente, na fase de Concepção, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre jogos aplicados à área da saúde e em pessoas com deficiência, classificação de jogos e sua respectiva teoria do *Flow*, tipos de deficiência física nos membros superiores, interfaces naturais, dispositivos vestíveis, dentre outros conceitos importantes. A finalidade desta pesquisa é solucionar o seguinte problema: a dificuldade que pessoas com deficiência física nos membros superiores, principalmente crianças e adolescentes, tem ao utilizar dispositivos tecnológicos tradicionais, necessitando, muitas vezes, da ajuda de terceiros.

Após o levantamento bibliográfico e a seleção dos trabalhos relacionados, entrou-se em contato com a Associação de Assistência à Criança Deficiente (AACD)/Unidade Uberlândia, para entender melhor o domínio do problema.

A AACD foi escolhida como instituição coparticipante da pesquisa, visto que ela é a unidade mais próxima da Universidade Federal de Uberlândia, onde foi desenvolvida a pesquisa, que viabiliza o tratamento de promoção da consciência corporal do público-alvo dessa pesquisa: crianças e adolescentes com deficiência física nos membros superiores. Além disso, ela é a organização mais abrangente criada para receber o público-alvo desta pesquisa, atendendo pacientes de diversas cidades da região. A finalidade da AACD é proporcionar a melhoria da qualidade de vida e aquisição de maior autonomia e independência às pessoas com deficiência.

Na fase de Elaboração, utilizou-se o software Enterprise Architect para modelagem da arquitetura do sistema e a construção de diagramas UML (*Unified Modeling Language*), de casos de uso, de classes, de atividades, análise de requisitos funcionais e não-funcionais da aplicação.

Na fase de Construção, foram utilizados o *software Unity 3D* e a linguagem de programação C# para desenvolvimento do jogo de quebra-cabeça com três níveis de dificuldade. Posteriormente, alterou-se o *Software Development Kit* (SDK ou Kit de Desenvolvimento de Software) do dispositivo vestível *Myo*, implementando-o no jogo.

A construção do jogo e a escolha do gênero utilizado para esta pesquisa foram acompanhadas pela equipe da AACD, a qual tem maior experiência com os pacientes, público-alvo do trabalho.

Na fase de Testes, a equipe da AACD fez um levantamento de crianças e adolescentes com faixa etária de oito a quinze anos que possuem deficiência nos membros superiores e frequentam a instituição.

Assim, após a aprovação do Comitê de Ética e Pesquisa da Universidade Federal de Uberlândia, os pesquisadores responsáveis por este estudo

entraram em contato com os pais e responsáveis de pacientes da AACD da Unidade Uberlândia-MG, com o intuito de convidá-los a participarem desta pesquisa em questão. Por se tratar de uma pesquisa com participantes menores de idade, antes do início do estudo, além da assinatura do Termo de Assentimento por parte do participante, todos os responsáveis assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Após todos os esclarecimentos prévios aos responsáveis e as crianças, e assinaturas dos termos previamente mencionados, foram incluídas nesta pesquisa 10 crianças com deficiência física em um dos membros superiores, bem como os seus responsáveis.

As crianças apresentavam idade entre oito a treze anos, de ambos os sexos. Em relação a faixa etária uma criança apresentava 8 anos e outra 9 anos, as demais encontrou-se com duas em cada faixa etária a seguir: de 10, 11, 12 e 13 anos. Em relação ao sexo, seis participantes eram do sexo feminino e quatro eram do sexo masculino.

Após a execução do jogo, foi aplicado ao participante da pesquisa um questionário sobre a avaliação da utilização do jogo mediada pelo dispositivo vestível *Myo*.

O questionário para avaliação da utilização de jogos mediada pelo dispositivo *Myo* foi elaborado a partir de um questionário para avaliação de jogos educacionais, proposto por (Savi et al., 2010). Ele foi escolhido porque aborda diversas características importantes sobre a jogabilidade com crianças, entre elas: motivação, atenção, relevância, confiança, satisfação, experiência do usuário, imersão, desafio, habilidade, competência, conforto, interesse, divertimento, aprendizado e conhecimento. Dessa forma, o questionário foi adaptado, reduzindo-o para 20 perguntas. Além das questões já existentes no questionário de (Savi et al., 2010), foram incluídas outras perguntas sobre o *Myo*, com a finalidade de abordá-lo melhor nos testes e investigar quais são os seus impactos na pesquisa.

3. Discussão e resultados

As 10 crianças que participaram da pesquisa possuem deficiência física congênita (desde o nascimento), ocasionada por malformação durante a gestação: 5 crianças possuíam agenesia de mão direita (CID Q71.3 - Ausência congênita de mão e de dedos) e outras 5 possuíam hipoplasia de falanges (CID Q71.8 - Outros defeitos de redução do membro superior). As crianças possuem outras deficiências também, podendo ser físicas (nos membros inferiores), mentais ou cardiovasculares.

Apesar de não ter sido um critério pré-estabelecido para participar da pesquisa, nenhum dos participantes conhecia o *Myo*, ou seja, o bracelete foi uma novidade para todas as crianças envolvidas nos testes. O desconhecimento prévio do jogo, aqui apresentado, é justificado pelo fato deste ser uma abordagem inovadora (Fernandes, 2017).

Referente às respostas sobre o grau de experiência das crianças com tecnologia, computadores, *tablets* e celulares, nove crianças referiram utilizar muitíssimo e uma a utilizar muito. Dessa maneira, percebe-se que os participantes da pesquisa usam dispositivos tecnológicos de modo intensivo, apesar de possuírem deficiência no membro superior. Assim, verifica-se que a tecnologia assistiva está em constante evolução, e está cada vez mais presente no dia-a-dia das pessoas (Fernandes, 2017).

Porém, os pais disseram que seus filhos gostam de utilizar esses aparelhos apenas em casa, com a família. Em ambientes externos, elas têm vergonha de mostrar a sua limitação motora no membro superior para pessoas desconhecidas, devido ao receio de preconceito e rejeição. Segundo Matos (2016), estes temores fazem com que os pais em determinadas vezes deixem de sair para lazer, a fim de evitar situações constrangedoras, uma vez que atitudes preconceituosas contra pessoas com deficiência ainda são encontradas em toda sociedade, sendo que reações impróprias e hostis são frequentes.

Assim, frente a estas situações enfrentadas por estas famílias, faz-se necessário um trabalho de educação emocional constante com as crianças com deficiência, pois estas características comportamentais e de desenvolvimento contribuem para que tenham mais vulnerabilidade afetiva e dificuldades de autocontrole e autorreconhecimento emocional. Faz-se necessário investigar se o uso de novas tecnologias, por meio da criatividade poderia auxiliar um processo de facilitação da autoaceitação por parte das pessoas com deficiência e ao despertar interesse de outras pessoas, diminuir as reações supersticiosas destas (Fernandes, 2017).

Todas as crianças referiram ter sido muito confortável a utilização do dispositivo *Myo* e terem se esforçado muitíssimo para ter bons resultados nos jogos, dessa forma, além de quererem muitíssimo jogar novamente. Pode-se observar que todos os participantes da pesquisa apreciaram o conforto do dispositivo vestível, sendo que isto pode ser um dos motivos facilitadores a estarem interessados e motivados a jogar e concluir o jogo com maior pontuação. O uso da tecnologia aplicada a este público, a qual entende as limitações e potencializa as capacidades das pessoas com deficiência pode ser uma maneira de estimular o lazer e a consciência da capacidade corporal nesta população, acarretando diretamente benefícios ao seu bem-estar, consequentemente à sua saúde, em seu caráter mais amplo.

Observou-se que algumas crianças apresentaram um comportamento similar ao jogar com ambos os braços, porém outras apresentaram maior dificuldade de controlar o jogo com o braço que possui a deficiência, informações que demonstram perspectivas positivas de aceitação, em especial pelo fato das crianças estarem utilizando ou tentando utilizar o membro com deficiência, já que atualmente o processo de reabilitação passou cada vez mais a estimular a realização de suas tarefas com o membro não acometido.

Outro fator observado foram as declarações dos pais ou responsáveis das crianças, que presenciaram a realização dos testes. Estes, em sua maioria,

gostaram da utilização de jogos mediados pelo dispositivo *Myo*, pois acreditam que esta prática estava auxiliando na melhoria da funcionalidade do membro com deficiência e principalmente da aceitação da mesma. A preocupação dos pais referente a independência funcional dos participantes, está presente também em outros pais de crianças com deficiência, onde eles afirmam que a apreensão surge inclusive em relação as projeções com relação ao futuro, como a escola e o trabalho.

A maioria dos responsáveis alegou que, apesar do tratamento já realizado com os filhos, acompanhamento com por uma equipe multidisciplinar composta por psicólogos, fisioterapeutas, terapeutas ocupacionais, ainda é muito difícil para as crianças lidar com a deficiência, pois as crianças possuem muita vergonha e transparecem sentir-se diferentes das demais pessoas e ainda apresentam sentimento de incapacidade com frequência, diante de determinadas atividades. Todavia, na participação desta nova atividade realizada por eles, percebeu-se que as crianças se sentiram motivadas a utilizar o braço com deficiência.

Os resultados provenientes dos testes realizados mostram que *Myo* pode ser uma boa alternativa para prover acessibilidade para pessoas com deficiência nos membros superiores. Assim, tornar os jogos digitais mais acessíveis para esse público é relevante, pois pode proporcionar maior acesso ao entretenimento digital, além de maior desenvolvimento e utilização do membro, podendo também auxiliar no processo de promoção da consciência corporal. Dessa forma, dentre os benefícios, discutidos na literatura, que o ato de jogar pode proporcionar, cita-se esta acessibilidade para as pessoas.

A escolha do jogo de quebra cabeça se mostrou adequada para os testes pois os participantes demonstraram, por meio de suas respostas, que o jogo foi bom, estimulante e atendeu as expectativas. Foi importante a escolha de um jogo simples em virtude da faixa etária dos participantes, bem como possíveis problemas neurológicos apresentados pelos mesmos. Assim, eles

punderam empreender uma maior carga cognitiva na utilização do *Myo* e não na aprendizagem do jogo, uma vez que o *Myo* era uma novidade para todos os participantes.

A utilização do *Myo* foi bem aceita. Os participantes se sentiram confortáveis e conseguiram interagir com o jogo alcançando os objetivos propostos pelo mesmo. Apesar de terem apresentado uma dificuldade moderada na utilização do *Myo*, este fato não interferiu na motivação e no envolvimento dos participantes com o jogo. Eles relataram que tiveram uma experiência divertida ao jogar. Dessa forma, percebe-se que o *Myo* pode ser utilizado como um dispositivo para melhorar a acessibilidade aos jogos digitais de pessoas com deficiência física nos membros superiores. Nessa perspectiva, tornando os jogos mais acessíveis, também se espera uma maior utilização dos jogos digitais pelo público alvo desta pesquisa. Assim, este público poderá usufruir dos benefícios da utilização dos jogos apresentados na literatura.

Considerações finais

Portanto, verifica-se que o objetivo proposto no início deste trabalho foi alcançado, uma vez que a utilização de jogos mediados pelo dispositivo vestível *Myo* se mostrou eficiente no uso de jogos digitais para pessoas com deficiência física nos membros superiores, proporcionando maior autonomia e acessibilidade ao entretenimento digital.

Logo, diante dos resultados referentes aos testes efetuados com pacientes e os questionários respondidos por eles, pode-se afirmar que é uma modalidade terapêutica inovadora para a promoção da consciência corporal, e também pode incentivar na criação de novos objetos de estudo e sistemas na área médica.

Como trabalhos futuros, pretende-se prosseguir com a seleção, desenvolvimento e adaptação de mais jogos com a finalidade de melhorar o

incentivo ao entretenimento digital para crianças e adolescentes com deficiência física nos membros superiores. Também acompanhar os impactos que a utilização do jogo a longo prazo pode acarretar para a promoção da consciência corporal dos indivíduos, do ponto de vista físico-motor e cognitivo.

Além disso, espera-se testar o jogo de quebra-cabeça para uso com o Myo com mais pacientes com deficiência física nos membros superiores, ampliar a faixa etária de aplicação do protótipo, e auxiliar a AACD na inauguração e manutenção da sala de Reabilitação Virtual na instituição em Uberlândia.

Também almeja-se realizar testes com pacientes que possuam deficiência física nos dois membros superiores para avaliar os resultados. E, posteriormente, nestes casos, verificar a possibilidade de utilizar dois dispositivos vestíveis (um para cada membro), podendo ampliar a pesquisa para uma estratégia de análise multimodal.

Ainda, deseja-se pesquisar dispositivos vestíveis para adaptar mais jogos para outros membros do corpo humano. Se possível, encontrar estratégias genéricas para utilização de jogos para todos os tipos de deficiência com a finalidade de promover a consciência corporal dos pacientes que se encontram nesta categoria. E também realizar o desenvolvimento de um módulo de supervisão da aplicação, no qual o profissional habilitado poderia visualizar gráficos para acompanhar a evolução de determinado paciente, e também comparar os resultados obtidos por diferentes pacientes na execução do jogo.

Por fim, aspira-se por estudar sobre design instrucional e universal de jogos para facilitar o desenvolvimento de jogos para promoção da consciência corporal de crianças com deficiência física nos membros superiores, além de pesquisar se há alguma estratégia para dispositivos móveis para quebra-cabeça em que a manipulação das peças ocorra de maneira mais fácil aos jogadores.

Referências

- FERNANDES, Flávia Gonçalves. **Uma estratégia para suportar interação humano-computador de crianças com deficiência nos membros superiores por meio de dispositivo vestível**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- GRANDE, Elaine Aparecida B. de; GALVÃO, Fábio Ricardo de O.; GONDIM, Luiz Carlos A. Reabilitação virtual através do videogame: relato de caso no tratamento de um paciente com lesão alta dos nervos mediano e ulnar. **Revista Acta Fisiátrica**, Rio Grande do Norte, v. 18, n. 3, p. 157-162, 2011.
- MATOS, Andreia Joana V. **Reconhecimento de expressões faciais como forma de interação entre o computador e pessoas com deficiência**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila-Real.
- MYO. **Thalmic Labs**: Myo Gesture Control Armband. 2016. Disponível em: <<http://bit.ly/2D34fYg>>. Acesso em: 30 mar. 2016.
- SANTOS, Jan Victor S. **Physioplay**: um exergame para reabilitação física aplicando a interatividade do Kinect como biofeedback visual. 2013. 60 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas.
- SAVI, Rafael; et al. Proposta de um modelo de avaliação de jogos educacionais. **Novas Tecnologias na Educação**, v. 8, n. 3, dez. 2010.
- SOUSA JUNIOR, Valdir D. et al. MoVER: Serious Game aplicado à reabilitação motora usando sensor de movimento Kinect. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 33, 2013, Maceió. **Anais...** Maceió: UFAL, 2013, p. 16-25.

Notas

- 98.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Professora da Unidade Acadêmica Especial de Biotecnologia, Doutoranda em Ciências Exatas e Tecnológicas da Unidade Acadêmica Especial de Física. Contato: flavia.fernandes92@gmail.com.
- 99.** Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Campus Uberlândia, Professor da Faculdade de Engenharia Elétrica. Contato: alexandre@ufu.br.
- 100.** Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Campus Uberlândia, Professor da Faculdade de Ciências da Computação. Contato: profrenatolopes@gmail.com.

Análise multi-escala de chapas considerando diferentes microestruturas para o material

*Maria Júlia Marques Silva*¹⁰¹

*Jordana Ferreira Vieira*¹⁰²

*Gabriela Rezende Fernandes*¹⁰³

Resumo: O presente trabalho apresenta a formulação do Método dos Elementos de Contorno para análise multi-escala aplicada ao problema de chapas. Nessa análise são definidos Elementos de Volume Representativos (EVRs) que representam a estrutura do material em sua microescala, modelada como uma placa com sub-regiões, onde são admitidas diferentes propriedades elásticas e modelos constitutivos para cada sub-região. Nos exemplos numéricos adotam-se EVRs com diferentes volumes de fração para a inclusão elástica, inclusões distribuídas de forma aleatória, além de um EVR com vazios. Para a obtenção da resposta numérica (valores homogeneizados das tensões e tensor constitutivo) o contorno e as interfaces da microestrutura são discretizados em elementos e os subdomínios em células triangulares.

Palavras-chave: Chapas. Método dos Elementos de Contorno. Elemento de Volume Representativo.

Introdução e metodologia

Na maioria dos casos, as soluções exatas de estruturas, são praticamente impossíveis de serem obtidas, pois há uma grande complexidade na geometria dos sólidos, além de necessitar de leis constitutivas complexas para

representar o comportamento dos materiais. Dessa forma, é preciso que se obtenha soluções aproximadas através de métodos numéricos, nos quais são dotadas aproximações para as leis constitutivas e as variáveis do problema. Dentre os métodos numéricos existentes, tem-se o Método dos Elementos de Contorno (MEC), que será usado nesse trabalho e é relativamente novo se comparado ao Método dos Elementos Finitos (MEF).

O Método dos Elementos de Contorno surgiu com o trabalho de Brebbia (1978), tendo sido desde então aplicado a diversos trabalhos para análise de estruturas, como: Fernandes (1997), Palermo Júnior (2000), Fernandes (2003), Fernandes & Souza Neto (2013), Fernandes et al. (2015), Dóro (2015), entre outros.

Grande parte dos materiais estruturais são heterogêneos e possuem um comportamento não linear, em que, se analisados microscopicamente pode-se observar diferentes fases com propriedades mecânicas diferentes. Segundo Furtado (2017), o processo de fissuração ou plastificação dado microscopicamente afeta a estrutura no todo (macro-contínuo). Dessa forma, surgiu a análise em multi-escala, que se dá pela análise da estrutura, onde o comportamento mecânico de cada ponto do macro-contínuo é definido através da análise da microestrutura do material (microescala), denominada de EVR (Elemento de Volume Representativo), que pode ser composto por diferentes materiais e por vazios, para que se possa representar a heterogeneidade do material.

O presente trabalho tem como objetivos fazer uma comparação entre o método utilizado por Fernandes et al. (2015) utilizando o MEC em conjunto com o Método dos Elementos Finitos (MEF) e assim validar a utilização apenas do MEC, que é um método relativamente novo. Além disso, pretende-se observar o quanto micro-estruturas diferentes podem afetar na rigidez da estrutura no topo, afetando então, os resultados obtidos.

1. Modelagem multi-escala

Em uma análise multi-escala, no domínio do macro-contínuo são definidos pontos de interesse que são os EVRs (Figura 135), os quais representam a microestrutura, em nível granular, do macro-contínuo na vizinhança infinitesimal do ponto (Souza Neto e Feijóo, 2006). Para cada EVR, que pode possuir vazios ou inclusões, é feito o monitoramento do processo de fissuração ou deformação.

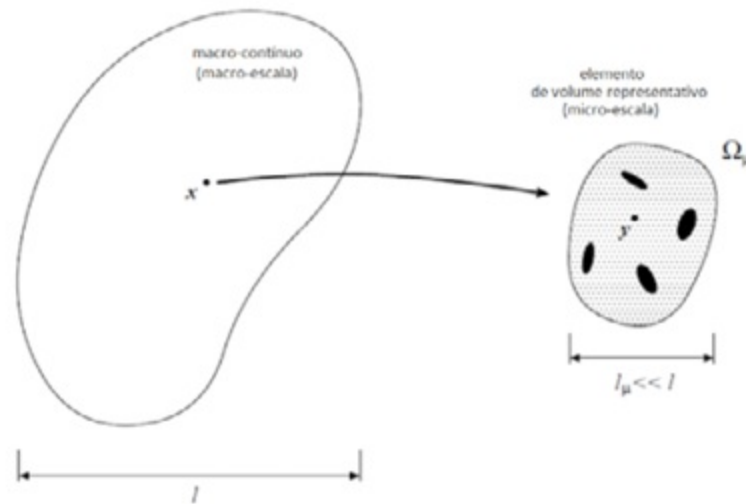


Figura 135. Macro-contínuo e microestrutura (EVR)

Fonte: Crozariol (2017).

Considerando um carregamento qualquer na estrutura estudada, segundo o modelo da macro-escala, pode-se obter o tensor de deformação para determinado ponto da mesma, esse tensor é imposto de forma constante ao EVR que está associado ao ponto do macro. A partir dessa solicitação obtém-se os campos de deformação, tensão e deslocamentos do EVR a partir de um processo iterativo, que acaba quando o campo de flutuação dos deslocamentos que satisfaz a equação de equilíbrio do EVR é encontrado, resolvendo, assim, o problema de equilíbrio do EVR. A flutuação dos deslocamentos representa a parcela de deslocamentos que surge quando a micro-estrutura do EVR é heterogênea (composta por vazios e/ou inclusões).

Para que seja possível transferir os valores dos campos de deformação e tensão da micro-escala para a macro-escala, são necessários os princípios de homogeneidade e conceitos de média volumétrica. Esses princípios fazem com que as relações constitutivas e as tensões para o ponto de interesse do macro-contínuo sejam atualizadas, sendo que, depois dessa atualização feitas em todos os pontos do macro, um novo incremento de carga é aplicado a estrutura e novos tensores de deformação são aplicados aos EVRs, fazendo com que haja uma alimentação mútua entre macro-escala e micro-escala.

2. Formulação do método dos elementos de contorno para análise não-linear física de chapas (macro-contínuo)

A solução do macro-contínuo é dada pelo problema não-linear bidimensional de placas, que foi formulado em Fernandes e Souza Neto (2013), pelo Método dos Elementos de Contorno (MEC). Na Figura 136, observa-se uma chapa com espessura $t \ll a$ e $t \ll b$, com contorno externo dado por Γ e domínio Ω , ela está sujeita a cargas e esforços apenas em seu plano médio (x_1, x_2). O equilíbrio de um ponto qualquer da chapa é dado pela Equação 1, na qual todas as variáveis são definidas em termos de taxas, ou seja, de suas derivadas no tempo.

$$N_{ij,j}(p) + \bar{b}_i(p) = 0 \quad (1)$$

Onde $\bar{b}_i = b_i t_s$ e b_i são forças distribuídas no plano da chapa, t a espessura da chapa e $N_{(ij,j)}$ a derivada da força normal na chapa.

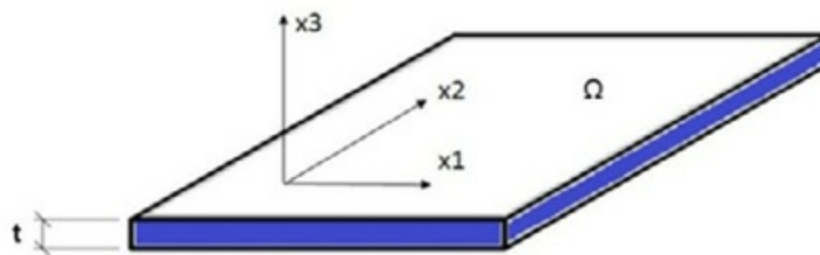


Figura 136. Representação para o elemento do problema de chapa

Fonte: Doro (2015).

A deformação total é dada pela Equação 2, sendo a soma da parcela elástica ε_{ij}^e com a parcela plástica e ε_{ij}^p :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (2)$$

Aplicando a Lei de Hooke na Equação 2, encontra-se as tensões elásticas, calculadas a partir das deformações totais e dadas pela Equação 3.

$$\sigma_{ij}^e = \sigma_{ij} + \sigma_{ij}^p \quad (3)$$

Ao integrar essas tensões ao longo da espessura da chapa, chega-se aos esforços de membrana, sendo N_{ij}^V os esforços relacionados à tensão verdadeira (σ_{ij}); N_{ij}^t são os esforços elásticos relacionados à tensão de tentativa (σ^e)_{ij} e N_{ij}^p são os esforços iniciais relacionados à tensão plástica (σ_{ij}^p). Os esforços elásticos N_{ij}^t podem ser obtidos pela Equação 4.

$$N_{ij}^t = \frac{\bar{E}}{1 - \nu^2} [\nu \zeta_{ii}^s \delta_{ij} + (1 - \nu) \zeta_{ij}^s] \quad (4)$$

Onde δ_{ij} é a função delta de Kronecker; $\bar{E} = E/t$; ν o coeficiente de Poisson e ε_{ij} a deformação total, dada na Equação 2.

2.1 Equação integral do deslocamento

Através do teorema de reciprocidade de Betti e fazendo a integração por partes ao longo da espessura da chapa obtém-se a equação integral do deslocamento no plano da placa (Equação 5).

$$K_i \dot{u}_i = - \int_{\Gamma} (u_n^* p_n^* + u_s^* p_s^*) d\Gamma + \int_{\Omega_b} (u_n^* p_n + u_s^* p_s) d\Omega + \int_{\Omega} (u_n^* b_n + u_s^* b_s) d\Omega + \int_{\Omega} (N_{\alpha\beta}^o \xi_{\alpha\beta}^*) d\Omega \quad (5)$$

Onde u_n^* , u_s^* , p_n^* e p_s^* são os valores fundamentais de deslocamentos e trações no plano, Ω_b é a região carregada da placa, K_i é o termo livre que assume valores diferentes dependendo da posição do ponto e

i,n e s são respectivamente as direções de aplicação da carga, normal ao contorno e direção do próprio contorno; os termos acompanhados por * representam o problema fundamental e k é a direção da carga fundamental.

O processo incremental iterativo utilizado para a obtenção da solução não-linear da chapa é baseado no Método de Newton-Raphson, em que, se calcula a correção que deve ser dada ao campo de deformações a partir do resíduo de forças (forças plásticas) e da matriz tangente consistente, os quais devem ser atualizados a cada iteração.

2.2 Equações algébricas do MEC para análise não-linear

Para cada nó do contorno da chapa têm-se quatro variáveis (u_s, u_n, p_s, p_n), em que duas delas são dadas como condição de contorno. Discretizando o contorno e o domínio, aproximando-se as variáveis nos elementos e células, é possível escrever as equações integrais na forma matricial. Escrevendo-se duas equações de deslocamento para cada nó do contorno obtém-se o sistema:

$$[H]\{\Delta U\} = [G]\{\Delta P\} + \{\Delta T\} + [E]\{\Delta N^P\} \quad (6)$$

Onde $[H]$ é resultado da integração dos esforços fundamentais ao longo do contorno; $\{\Delta U\}$ é o vetor dos incrementos de deslocamentos no contorno; $[G]$ é resultado da integração dos deslocamentos fundamentais no contorno; $\{\Delta P\}$ é o vetor dos incrementos das forças no contorno; $\{\Delta T\}$ é o vetor da carga externa; $[E]$ é a matriz obtida integrando as células e $\{\Delta N^P\}$ é o vetor do incremento de forças plásticas.

Aplicando as condições de contorno na Equação 8 e isolando o vetor das incógnitas $\{\Delta X\}$ obtém-se a resolução numérica, dada na Equação 7.

$$\{\Delta X\} = \{\Delta L\} + [R_N]\{\Delta N^P\} \quad (7)$$

Onde $[R_N]$ representa a influência das forças normais plásticas nos deslocamentos do contorno e $\{\Delta L\}$ é a resposta elástica sem considerar os

esforços iniciais ou plásticos.

Para se obter a solução não-linear, devem ser escritas três equações das forças de membrana elásticas de tentativa $\{\Delta N^{e(MEC)}\}_{jk}$ nos nós da célula. Essas equações podem ser escritas como:

$$\{\Delta N^{e(MEC)}\} = \{\Delta K\} + [S_N] \{\Delta N^P\} \quad (8)$$

Onde $\{\Delta K\}$ é a solução elástica dada em termos de incremento de forças de membrana e $[S_N]$ é o efeito do incremento de forças de membrana inelásticas $\{\Delta N^P\}$.

2.3 Equação de equilíbrio e Matriz Tangente Consistente

Para que se obtenha a solução do MEC, a equação de equilíbrio (Equação 9) deve ser satisfeita para cada incremento n de carga.

$$R_N = \{\Delta K\} - \{\Delta N^{v(MEC)}\} = 0 \quad (9)$$

Onde R_N é o resíduo das forças normais; $\{\Delta K\}$ o vetor de forças normais elástico e $\{\Delta N^{v(MEC)}\}$ é o vetor de forças normais verdadeiro na placa.

Para se chegar ao equilíbrio, a Equação 9 deve ser igual a zero e com isso são obtidos os valores reais das incógnitas da placa. No processo iterativo serão dadas correções de deformação plana à placa. Então, é preciso que se escreva a Equação 9 em termos de vetor de deformação $\Delta \epsilon$ e das forças normais verdadeiras ΔN que está relacionada à deformação através do tensor elastoplástico C_N , chegando-se a Equação 10.

$$R_N = 2\{\Delta K_n\} - [C_N] \{\Delta \epsilon_n\} + [S_N] ([C_N] \{\Delta \epsilon_n\} - \{\Delta N_n^v\}) + \{\Delta N_n^v\} = 0 \quad (10)$$

Quando se aplica o incremento de deformações $\Delta \epsilon_n$ à placa, caso a Equação 10 seja verificada tem-se um incremento elástico, caso contrário, o incremento aplicado à placa não é elástico e haverá um resíduo R_N , devendo-

se então, prosseguir para o processo incremental iterativo até que se chegue ao valor de $\Delta \varepsilon_n$ que satisfaça a equação de equilíbrio da placa. Assim deve-se calcular $\Delta \varepsilon_n^{i+1} = \Delta \varepsilon_n^i + \delta \Delta(\varepsilon)_n^i$ onde $\delta \Delta(\varepsilon)_n^i$ é a correção no estado de deformação plana, obtida a partir da linearização da equação de resíduos (Equação 10), pelo processo de Newton-Raphson, através da Equação 11:

$$\{R_N\}_n^{i-1} + \frac{\partial \{R_N\}_n^{i-1}}{\partial \{\Delta_N\}_n^{i-1}} \{\delta \Delta \xi\}_n^{i-1} = 0 \quad (11)$$

Onde

$$[k^{TC}] = - \frac{\partial \{R_N\}_n^{i-1}}{\partial \{\Delta_N\}_n^{i-1}}$$

é denominada Matriz Tangente Consistente

3. Formulação do mec para análise de microestruturas heterogêneas

3.1 Problema de Equilíbrio do EVR

A microestrutura do material é representada pelo Elemento de Volume Representativo (EVR), que no presente trabalho será modelado pelo MEC, considerando uma placa dividida em sub-regiões, podendo possuir diferentes propriedades elásticas. A Figura 137 representa um EVR com 3 sub-regiões, sendo uma matriz e duas inclusões. A equação integral do deslocamento é encontrada considerando o Teorema de Reciprocidade de Betti, que relaciona o problema fundamental com o real. Fazendo a integração por partes da mesma chega-se ao deslocamento u_K para um ponto do domínio da placa.

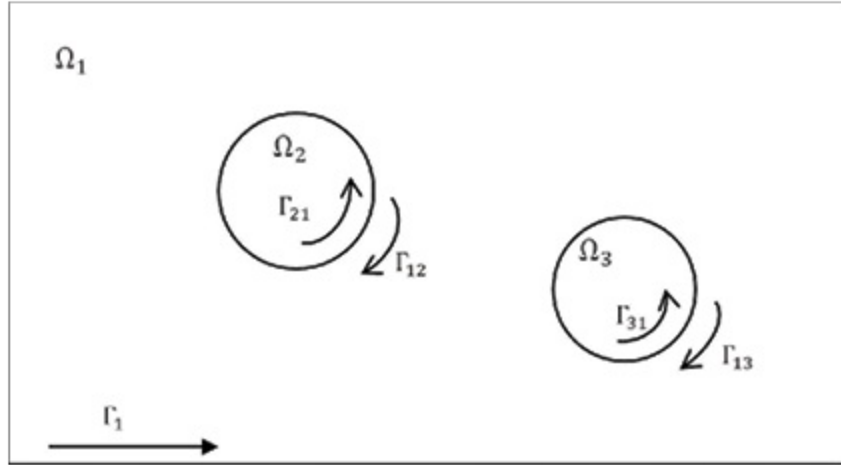


Figura 137. EVR com duas inclusões, totalizando 3 sub-regiões

Fonte: Furtado (2017).

Depois disso, discretizando o contorno e as interfaces do EVR em elementos e o domínio em células triangulares a equação integral é transformada em equação algébrica. Escrevendo-se 2 equações de deslocamento para cada nó do contorno, interface e interno ao domínio, chega-se ao sistema de equações (Equação 12), que pode ser resolvido se impostas as condições de contorno.

$$\{N^{e(MEC)}\} = - [[H]]_c [H']_i \left\{ \begin{Bmatrix} \{U\}_c \\ \{U\}_i \end{Bmatrix} \right\} + [G']_i \{P\}_c + [E'] \{N^0\} \quad (12)$$

Onde c é o índice para nós do contorno; i é o índice para nós internos (inclusive de interface); $\{U\}$ é o vetor dos deslocamentos nodais; $\{N^0\}$ é o vetor dos esforços plásticos e $\{P\}_c$ é o vetor das forças nodais no contorno.

O equilíbrio do EVR é satisfeito quando o somatório das forças normais verdadeiras $\{N\}$, que satisfazem o modelo constitutivo, é nulo, conforme dado na Equação 13.

$$R_F = \sum_{K=1}^{N_{cel}} \{N\}_K \equiv 0 \quad (13)$$

O campo de deslocamentos ($u_\mu(y,t)$) é a soma daqueles obtidos a partir da imposição da macro deformação $\varepsilon(\mathbf{x})$ ao contorno do EVR ($u_\mu^\varepsilon(y)$) com o termo da flutuação do deslocamento ($\tilde{u}_\mu(y,t)$) necessária para satisfazer a equação de equilíbrio do EVR, como apresentado na Equação 14.

$$u_\mu(y) = u_\mu^\varepsilon(y) + \tilde{u}_\mu(y) \quad (14)$$

A parcela de flutuação representa a variação da deformação ao longo do EVR, que ocorre devido a heterogeneidade do material. Assim, faz-se a representação da equação de resíduos (Equação 13) em termos de incrementos de flutuação $\{\Delta\tilde{u}\}$ e, em seguida, a linearização pelo Método de Newton-Raphson, obtém-se a matriz tangente do EVR, atualizada a cada iteração, a fim de solucionar o problema de equilíbrio do EVR. Considerando uma iteração i , a correção no estado de flutuação dos deslocamentos ($\delta\Delta\tilde{u}_n^i$) é calculada a partir da seguinte equação:

$$\{R_h\}_n^{i-1} + \frac{\partial \{R_F\}_n^{i-1}}{\partial \{\Delta\tilde{u}\}_n^{i-1}} \{\delta\Delta\tilde{u}\}_n^i = 0 \quad (15)$$

Onde R_h são os resíduos de forças referentes às células triangulares.

Para obter a matriz tangente consistente, deriva-se a Equação 15 em relação ao incremento de flutuação dos deslocamentos, podendo ser apresentada da seguinte forma:

$$[K^T]^i = \sum_{k=1}^{Noel} [B]_k^T [C_N^*]_n^i [B]_k A_k + \sum_{\ell=1}^{N_f} K_\ell^{(i)} \quad (16)$$

A matriz $([C_N^*]_n^i)$ da Equação 16 representa a matriz tangente que relaciona a tensão real com o incremento de deformação, obtido através do modelo constitutivo adotado (Ohland, 2017).

A fim de completar a formulação do EVR, as restrições cinemáticas são escolhidas e impostas no mesmo em termos de flutuações de deslocamento. Essas restrições conduzem a diferentes classes de modelo de multi-escala e,

portanto, a diferentes resultados numéricos. Na formulação desenvolvida, (i) deslocamentos lineares no contorno do EVR, (ii) Flutuações dos deslocamentos periódicos sobre o contorno e (iii) forças de superfície uniformes sobre os contorno são condições de contorno que podem ser impostas para o EVR (ver detalhes em Souza Neto e Feijó (2006), Fernandes et al. (2015 a, b)).

4. Tensão e tensor constitutivo homogeneizados

Os tensores de tensão σ e deformação ε são assumidos como sendo a média volumétrica de seu respectivo campo microscópico ε_μ ou σ_μ por todo o EVR relacionados a um ponto x do macro. Deste modo, considerando um instante t qualquer, a deformação $\varepsilon(x,t)$ de um ponto x no macrocontínuo é da pela Equação 17, da mesma forma é obtida a tensão $\sigma(x,t)$

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \varepsilon_\mu(y, t) dV \quad (17)$$

Onde os valores com índice μ refere-se ao EVR, portanto, V_μ é o volume do EVR e y se refere a um ponto arbitrário no EVR.

A partir da tensão $\sigma(x,t)$, pode-se obter a seguinte expressão para o tensor da tensão homogeneizada, considerando as relações desenvolvidas no trabalho de Souza Neto e Feijó (2006):

$$\sigma(x, t) = \frac{1}{2V_\mu} (\bar{\sigma} + \bar{\sigma}^T) \quad (18)$$

Onde

$$\bar{\sigma} = \sum_{i=1}^{N_c} \{F_c\}_i \{y\}_i^T$$

, sendo F_c forças calculadas a partir de P_c sendo os vetores dos deslocamentos nodais no contorno U_c obtido após a solução do problema de equilíbrio do EVR, ou seja, considerando-se o campo de flutuações dos

deslocamentos encontrados na solução do equilíbrio do EVR. Destaca-se que para se obter as forças F_C faz-se o produto entre as forças P_c (por unidade de comprimento) e o comprimento de influência do respectivo nó.

O operador tangente homogeneizado representa a derivada da tensão em relação a deformação, e como desenvolvido nos trabalhos de Souza Neto e Feijó (2006) e Fernandes et al (2015 a, b) pode ser dividido conforme a Equação 19.

$$D_{n+1} = D_{n+1}^{Taylor} + \tilde{D}_{n+1} \quad (19)$$

Onde D^{Taylor} representa a média volumétrica do tensor constitutivo incremental e $\tilde{D}_{n+1}$ representa a influência do campo de flutuação dos deslocamentos.

5. Discussão e resultados

Com o intuito de validar a formulação apresentada neste trabalho, dois exemplos discutidos no trabalho de Fernandes et al. (2015a) foram simulados considerando o MEC nas duas escalas.

Em uma primeira análise, considerou-se uma placa de alumínio sujeita a uma tensão normal (Figura 138a), submetida a um estado plano de tensão. Devido à simetria da placa, apenas um quarto da placa é considerado (Figura 138b), sendo a discretização composta por 16 elementos no contorno, 36 nós no contorno e 24 células no domínio (Figura 138b), com espessura de $t=1\text{mm}$. Uma força $p_n=121,5 \text{ N/mm}$ foi imposta aos nós de 19 a 23, e adotou-se borda livre nos nós de 6 a 18 e $u_n=0$ e $p_s=0$ foram aplicados aos nós 1 a 5 e 24 a 36. Considera-se n e s a direção da força normal e tangencial no contorno da placa, respectivamente.

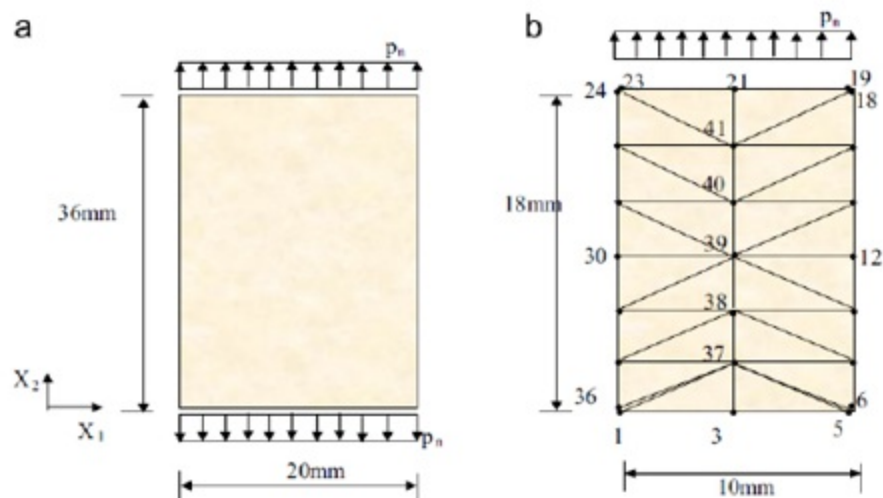


Figura 138. a) Placa sujeita ao carregamento; b) Placa discretizada.

Fonte: Fernandes et al. (2015).

A Tabela 80 apresenta a discretização dos três EVRs da Figura 139 e analisados neste exemplo. Como condição de contorno, adotou-se a flutuação periódica no contorno dos três EVRs supostos.

EVR	Nº de células triangulares	Nº de nós no contorno
Uniforme	8	8
5 vazios	333	242
5 inclusões	520	293

Tabela 80. Discretização dos EVRs com diferentes distribuições das inclusões

Fonte: Próprio autores (2017).

As propriedades definidas para a matriz dos modelos são: Coeficiente de Poisson $\nu=0,2$; Módulo de Young $E=70\text{GPa}$ e a tensão de escoamento $\sigma_y=243\text{MPa}$. Ainda considera-se $K=0,032E$, pois há endurecimento isotrópico (Modelo de Von Mises). Para as inclusões as propriedades elásticas são $\nu=0,2$; $E=200\text{GPa}$. Para mostrar a robustez da modelagem

proposta, a distribuição de inclusão é feita aleatória e apresentam forte heterogeneidade, com diferentes tamanhos e localizações (Figura 139).

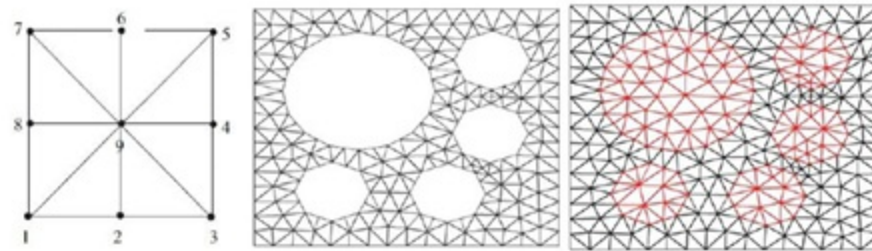


Figura 139. a) Modelo 1: discretização do EVR uniforme; b) Modelo 2: discretização do EVR com vazios; c) Modelo 3: discretização do EVR com inclusões

Fonte: Fernandes et al. (2015a).

Foram analisados os deslocamentos encontrados no contorno (nó 21), para a direção de x_2 , onde β é dado como o fator de carga (ver Figura 140). Nota-se que todos os testes apresentaram valores muito próximos aos resultados de Fernandes et al. (2015a), podendo-se afirmar que a formulação do MEC para modelagem multiescala é eficiente. Note que para o modelo 1, EVR uniforme, o EVR encontra-se com apenas uma fase, que por sua vez é a mesma da matriz, logo a solução é idêntica à análise não-linear convencional por meio do MEC ou considerando multi-escala através do MEF.

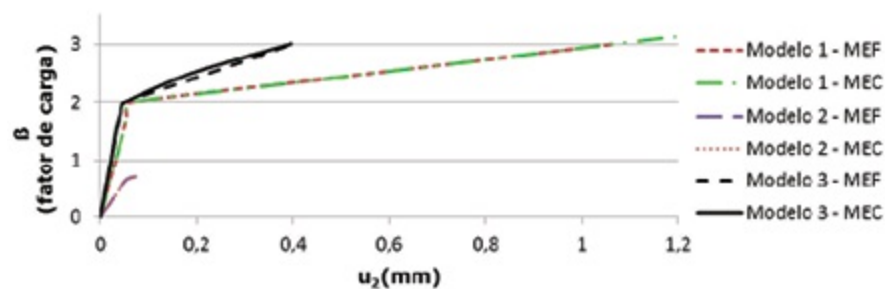


Figura 140. Comparação dos resultados do deslocamento $u_2(\text{mm})$ do nó 21 do contorno, para diferentes EVRs com o MEF e o MEC

Fonte: Próprios autores (2017).

O segundo exemplo estudado no presente trabalho é a chapa mostrada na Figura 141, que por ser totalmente simétrica foi dividida em quatro partes, assim, será analisado apenas $\frac{1}{4}$ da chapa. A discretização da chapa se dá em 100 elementos e 206 nós no contorno. Como condição de contorno adotou-se como livres os nós 1 ao 42 e 64 ao 125, prescreveu-se $u_n=0$ e $p_s=0$ para os nós 43 ao 63 e 166 a 206 e aplicou-se uma força $p_n=121,5$ N/mm nos nós 125 ao 165.

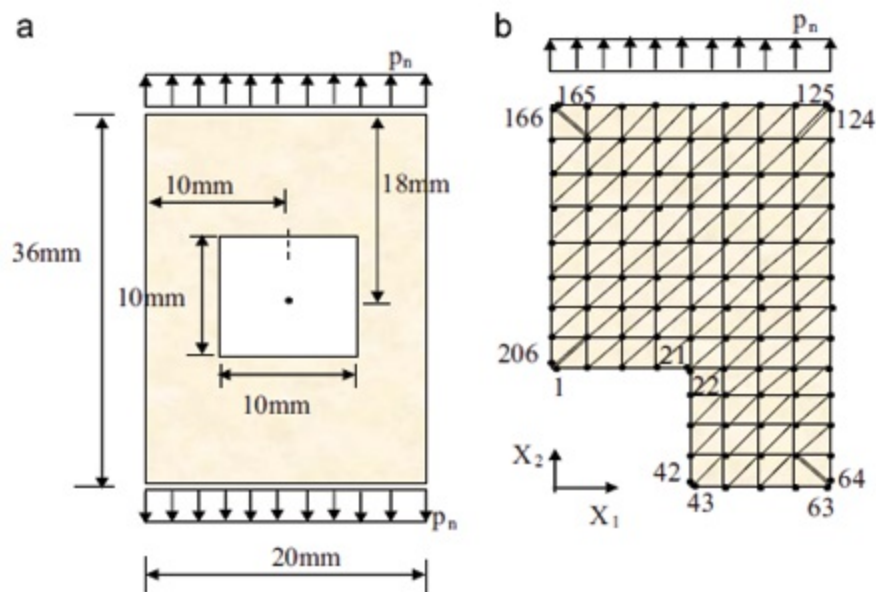


Figura 141. Exemplo: (a) Geometria da chapa (b) Discretização da chapa

Fonte: Fernandes et al. (2015).

Foram analisados três tipos de EVR, o primeiro com um EVR uniforme, ou seja, se assemelha a análise convencional não-linear, o segundo com uma inclusão elástica de 30% do seu volume e o terceiro com uma inclusão elástica de 50%. A Figura 142 representa os EVRs com inclusão elástica, respectivamente.

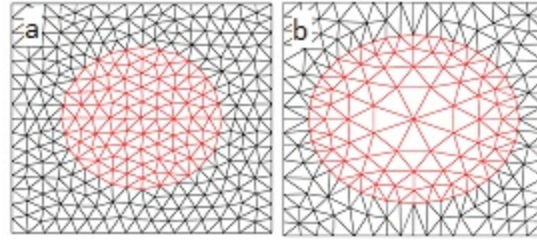


Figura 142. (a) EVR com 30% de inclusão elástica (b) EVR com 50% de inclusão elástica

Fonte: Fernandes et al. (2015).

As propriedades do material da matriz (onde considera o modelo de von Mises) são: $E=70$ GPa, $\nu=0,2$, $K=0,032E$ e $\sigma_y=243$ MPa e da inclusão elástica dos EVRs que a possuem: $E=200$ GPa e $\nu=0,2$. Os resultados obtidos com o MEC foram comparados com os resultados de Fernandes et al. (2015), que fez uma análise acoplando o MEC com o Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo essa comparação mostrada na Figura 143. Para tal, foram usados os resultados referentes ao nó 1 da chapa.

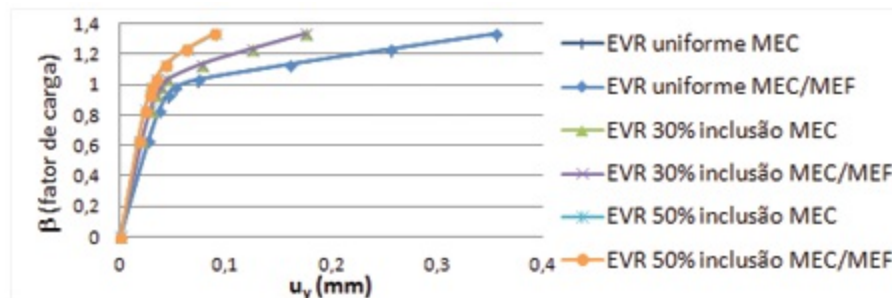


Tabela 143. Deslocamento no nó 1 e direção 2

Fonte: Próprios autores (2017).

Outro fator importante de observar na Figura 140 e no Tabela 143 é o comportamento dos diferentes EVRs adotados. Quando se trata de EVR com inclusão elástica, os deslocamentos apresentados para um determinado ponto, à medida que o fator de carga (β) aumenta, são bem menores quando comparados ao EVR uniforme. A inclusão elástica possui um módulo de elasticidade (200GPa) maior que a matriz do EVR (70GPa), sendo assim,

quando se tem inclusão elástica, o EVR fica mais rígido, apresentando pequenos deslocamentos com o aumento do fator de carga. Quando o EVR possui vazios em seu interior, a rigidez do mesmo diminui. Logo, o material torna-se mais frágil. Além disso, quando se tem um EVR com inclusões perfeitamente plásticas, diminui a rigidez e resistência do mesmo se comparado àquele com inclusão elástica. Nesse caso, considerando o primeiro exemplo numérico o fator de carga limite (β) diminui para 2,5 e os deslocamentos são significativamente maiores se comparados aos valores do EVR uniforme.

Considerações finais

Neste presente trabalho foi apresentada a formulação do método dos elementos de contorno (MEC) para as análises em multi-escala de placas compostas por materiais heterogêneos através do MEC.

Nos exemplos numéricos, buscou-se analisar diferentes EVRs, compostos por vazios ou inclusões, a fim de analisar o comportamento da placa a cada composição da microestrutura. Observou-se que a presença de vazios influencia significativamente no comportamento do material, pois diminui a rigidez e a resistência deste. Do mesmo modo, concluiu-se que a presença de inclusões elásticas de diferentes frações volumétricas e com propriedades mecânicas mais rígidas que a matriz do EVR, aumenta a resistência do material, tornando as placas mais resistentes quando submetidas à ação de um carregamento qualquer. Sendo assim, os EVRs com vazios atingiram a ruptura com um fator de carga bastante inferior aos de inclusões. Para os EVRs com inclusões, e comparando ao EVR uniforme com matriz elastoplástica, nota-se que com as inclusões elásticas apresentaram respostas mais rígidas, como esperado.

As respostas obtidas foram comparadas com a uma formulação onde o MEF é aplicado à microestrutura, como apresentado em Fernandes et al.

(2015a), a fim de validar a formulação apresentada. As análises se demonstraram satisfatórias, uma vez que os resultados apresentaram semelhanças bastante consideráveis.

Também foi realizado um teste de convergência com o refinamento da discretização da microestrutura, onde identificou-se a convergência dos resultados para as duas malhas mais refinadas, o que também ajuda a validar a formulação utilizando o MEC na microestrutura.

Portanto, com esse projeto pode-se concluir que a modelagem multi-escala através do MEC é eficiente e robusta.

Referências

- BREBBIA, C. A. **The boundary element method for engineers**. London: Pentech Press, 1978.
- DÓRO, Vinicio da Cunha. **Análise não linear de chapas através de uma formulação do método dos elementos de contorno com convergência quadrática**. 2015. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- CROZARIOL, Luis Henrique de R. **Análise do Comportamento de Microestruturas Heterogêneas pelo Método dos Elementos de Contorno Considerando-se Não-Linearidade Física**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- FERNANDES, Gabriela Rezende. **Análise não-linear de estruturas de pavimentos de edifícios através do Método dos Elementos de Contorno**. 2003. 295 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- _____. **Introdução ao Método dos Elementos de Contorno**. Ilha Solteira: Unesp, 2005.
- _____. SOUZA NETO, Eduardo A. Self-consistent linearization of non-linear BEM formulations with quadratic convergence. **Computational Mechanics**, v. 52, p. 1125-1139, 2013.
- _____. PITUBA, José J. de C.; SOUZA NETO, Eduardo A. de. FEM/BEM formulation for multi-scale analysis of stretched plates. **Engineering**

Analysis With Boundary Elements, [s.l.], v. 54, p.47-59, 2015.

_____. FEM/BEM formulation for multi-scale analysis of stretched plates.

Engineering Analysis with Boundary Elements, v. 54, p. 47-59, 2015a.

_____. Multi-Scale Modelling For Bending Analysis of Heterogeneous Plates by Coupling BEM AND FEM. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 51 p. 1-13, 2015b.

FURTADO, Amanda Soares. **Análise do comportamento mecânico da microestrutura de materiais heterogêneos submetida a deformações lineares através do método dos elementos de contorno**. 2017. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Catalão.

OHLAND, Guilherme Avino. **Análise de microestruturas heterogêneas através de uma formulação do método dos elementos de contorno considerando materiais com comportamento elástico**. 2017. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

SOUZA NETO, Eduardo A.; FEIJÓO, Raúl A. Variational foundations of multi-scale constitutive models of solid: Small and large strain kinematical formulation. **Internal Research & Development Report**, National Laboratory for Scientific Computing (LNCC/MCT), Brazil, n. 16, 2006.

Notas

101. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: mariajuliamrq@gmail.com.

102. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: jordanaferreirav@gmail.com.

103. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2. Contato: gabrielar.fernandes@gmail.com.

Análise numérica das reações de apoio, de uma torre treliçada, sujeita a carregamentos externos

*Marcos Napoleão Rabelo*¹⁰⁴

*Leandro Ramaldes*¹⁰⁵

*Karla Leandro Melissa*¹⁰⁶

*Werley Rafael da Silva*¹⁰⁷

Resumo: Neste trabalho estudou-se a modelagem de um elemento estrutural treliçado, simulando uma torre de transmissão de linhas elétricas. A partir do carregamento fornecido pelas linhas de transmissão será feito, através do método dos elementos finitos uma análise das forças atuantes em cada um dos elementos na estrutura, bem como as tensões de tração e compressão. Simulações serão feitas para determinar o comportamento dos elementos estruturais e reações de apoio para diversos tipos de carregamento.

Palavras-chave: Elementos Finitos. Teoria de Estruturas.

Introdução

Neste trabalho foram analisadas as forças internas de um sistema estrutural baseado em treliças espaciais, utilizadas em torres de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Foi usando o software ANSYS 18.1 para a simulação computacional e o software MATLAB para a implementação numérica dos códigos.

A técnica de elementos finitos foi utilizada como ferramental teórico para o desenvolvimento das análises.

O uso de torres de transmissão tem sua importância comprovada, uma vez que, a energia elétrica é o tipo de energia que mais se produz e mais se consome no Brasil e no mundo. Um dos elementos estruturais responsáveis por fazer a conexão entre as unidades geradoras e centros consumidores, (Blessman, 1998).

Para desempenhar este papel de conexão, entre usina e os centros consumidores, as torres de transmissão são construídas em locais que apresenta condições adversas das mais variáveis possíveis. Problemas envolvendo topografia e geologia da região são parâmetros que devem ser considerados no projeto destes elementos estruturais. Obviamente que, outros fatores também devem ser levados em consideração na hora da confecção do projeto, como por exemplo, forças dinâmicas de arrasto devido à velocidade incidente do vento na estrutura.

A literatura sobre análise de sistemas estruturais treliçados tem mostrado que um dos temas que mais tem atraído a atenção dos pesquisadores são os efeitos que as forças de arrasto geram na estrutura e como estas forças interferem no balanço de forças internas e na geometria das estruturas (Singh, 2009; Bayar, 1986). As forças dinâmicas, devido ao vento, foram analisadas, do ponto de vista numérico e experimental devido a forças dinâmicas de ventos, nos trabalhos de Carril (Carril, Jr., 2000).

Problemas de deflexões de viga, comportamento das reações de apoio devido a carregamentos estáticos e dinâmicos na estrutura são encontrados em (Guimarães, 2000). Validação numérica de parâmetros estabelecidos em normas pode ser encontrada em (Nascimento, 2002).

O artigo está dividido da seguinte forma: na seção 1 será obtida o comportamento da condutividade hidráulica a partir de valores de carga de pressão total. Na seção 2 serão usadas fórmulas empíricas, que descrevem o comportamento da granulometria do solo a partir de parâmetros como: densidade do solo e da água; variação da velocidade de escoamento da água

no solo; a partir das informações obtidas no passo anterior, serão utilizados os modelos, fornecidos pela literatura, para descrever o comportamento hidráulico do solo e na seção 3 será feita as considerações finais do trabalho.

Desenvolvimento Teórico

O método dos elementos finitos se baseia na teoria dos grafos para descrever a geometria de sólidos por meio de arestas e nós. Assim, na teoria as arestas são chamadas de elementos, mais ainda, é associado ao sólido uma estrutura de nós e elementos, de forma que, quanto maior a quantidade de nós e elementos, maior será a precisão do modelo discretizado, uma vez que o método de elementos finitos é um processo de aproximação envolvendo polinômios, cujos coeficientes são dados em função dos nós. Uma vez construído a malha, todos os carregamentos, concentrados ou uniformes, são considerados aplicados nos nós. Desta forma o deslocamento da estrutura esta relacionada com o deslocamento dos nós e vice-versa. Para formulação das equações, considere o seguinte problema de deslocamento,



Figura 144. Elemento de mola (e) conectado aos nós i e j

Fonte: Autor.

Conforme podemos ver, o balanço de forças entre os nós (i) e (j) é dado por,

$$P^e = k^e(u_j - u_i) \quad (1)$$

Na equação (1) k^e , representa a rigidez do elemento e ; u_i , u_j representam o deslocamento dos nós i e j respectivamente. Também podem ser deduzidas as seguintes equações

$$\begin{aligned} k^e(u_i - u_j) &= f_i^e, \\ k^e(u_j - u_i) &= f_j^e, \end{aligned} \quad (2)$$

As equações em (2) podem ser reescritas na forma matricial

$$k^e \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i^e \\ f_j^e \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Em (3), o termo do lado direito é a matriz do elemento (e). A equação (3) é comumente descrita na forma matricial por

$$K^E q^e = f^e. \quad (4)$$

A equação (4) descreve a dinâmica dos graus de liberdade apenas em uma dimensão. Para situações onde é preciso o movimento em duas ou três direções é necessário trabalhar o conceito de coordenadas locais e coordenadas globais. Conforme pode ser visto, na figura 145 temos movimento em duas direções, neste caso cada nó possui dois graus de liberdade.

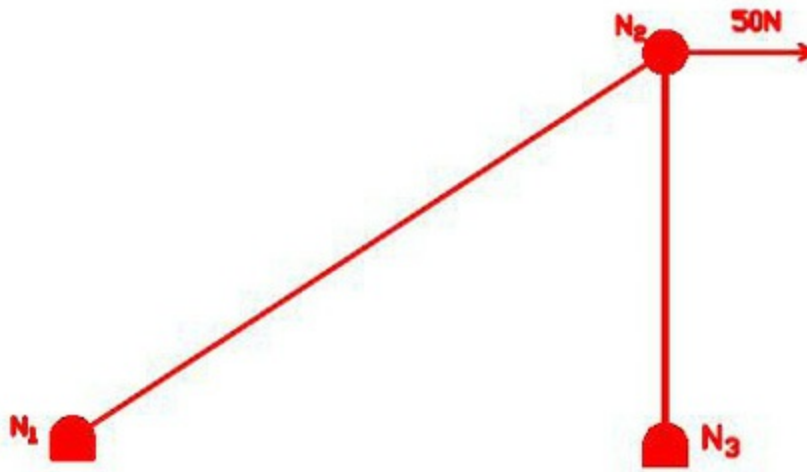


Figura 145. Treliça Bidimensional

Fonte: Próprio autor.

As coordenadas locais considera o sistema de referência na estrutura, enquanto as coordenadas globais considera o sistema de referência fora da

estrutura. De forma a fazer com que os sistemas de coordenadas possam ser relacionados, ou seja, a partir do conhecimento das coordenadas locais obtêm-se as coordenadas globais e vice-versa, é necessário utilizar a matriz de elementos dada pela equação abaixo,

$$K^e = \left(\frac{EA}{L} \right)^e \begin{bmatrix} 1^2 & 1n & -1^2 & -1n \\ 1n & n^2 & -1n & -n^2 \\ -1^2 & -1n & 1^2 & 1n \\ -1n & -n^2 & 1n & n^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

As entradas da matriz em (5) são os cossenos diretores dos respectivos elementos.

Para sistemas estruturais treliçados no R^3 a matriz dos elementos deve conter a informação referente ao eixo z, conforme figura 146 abaixo.

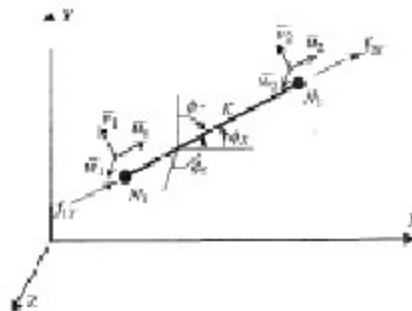


Figura 146. Sistemas de Coordenadas

Fonte: próprio autor.

Assim para o caso tridimensional a matriz de cada elemento assume a seguinte forma

$$K^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1^2 & 1n & 1h & -1^2 & -1n & -1h \\ 1n & n^2 & 1m & -1n & -n^2 & -1m \\ 1h & 1m & n^2 & -1h & -1m & -n^2 \\ -1^2 & -1n & -1h & 1^2 & 1n & 1h \\ -1n & -n^2 & -1m & 1n & n^2 & 1m \\ -1h & -1m & -n^2 & 1h & 1m & n^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Conforme pode ser visto em (6), no espaço tridimensional a matriz relativa ao elemento k^e possui ordem 6×6 , pois cada elemento na estrutura está sempre conectado a dois nós, que por sua vez possui sempre três coordenadas, x , y e z . Procede-se ao cálculo de todas as matrizes relativo a cada um dos elementos que compõem a estrutura. Após o cálculo de cada um dos elementos, o próximo passo então é a montagem da matriz global. Para este estágio deve ser observada a conectividade de cada um dos nós da estrutura, ou seja, deve ser observado em quantos elementos cada um dos nós está conectado. Esta informação é de extrema importância, pois é a partir do conhecimento da conectividade que é calculado a contribuição de cada nó na matriz global. Esta contribuição consiste na soma dos componentes dos nós relativo a cada um dos elementos aos qual o mesmo nó está conectado e de acordo com sua conectividade. O passo seguinte é a montagem dos blocos que estão fora da diagonal principal. Pelo fato da matriz global de rigidez ser simétrica basta fazer o processo para uma parte triangular, inferior ou superior, e usando simetria determinar a outra parte.

Um fato importante que deve ser mencionado, é que a abordagem adotada no presente trabalho leva em consideração o método direto. Isto quer dizer que a rigidez dos elementos da estrutura é previamente conhecida, restando, para completar o trabalho, apenas a montagem da matriz global.

Uma vez completado o estágio da montagem da matriz global resta, para resolver os sistemas lineares, conhecer as condições de contorno. É importante observar que, sem essas informações não é possível determinar o campo de deslocamento. Isto se dá pelo fato que, as incógnitas do sistema são: o campo de deslocamentos, que leva em consideração cada um dos nós da estrutura, além das reações de apoio, que também são incógnitas a serem calculadas. Mais ainda, pelo fato de estar trabalhando no R3 todos estes graus de liberdade devem ser multiplicados por 3, para que possa ser computado as três coordenadas, referente aos três eixos, x , y e z . Ao se computar todos os

graus de liberdade como incógnitas, temos um sistema com mais incógnitas do que equações, fazendo com que a matriz global se torne singular.

O procedimento para resolver o sistema e calcular todos os graus de liberdade consiste em: (i) desconsiderar todos os graus de liberdade referentes às reações de apoio, uma vez que nestes pontos não há deslocamentos; (ii) considerar todas as forças externas atuando no sistema. Com este procedimento, calculam-se os graus de liberdade restantes e levando em consideração os deslocamentos nas reações de apoio são nulas, monta-se o vetor campo de deslocamentos. De posse desse vetor e das forças externas atuando no sistema é possível calcular as reações de apoio na estrutura.

Esta metodologia será usada na próxima seção para calcular o deslocamento de uma estrutura com vinte elementos e dez nós levando em consideração o carregamento devido às linhas de transmissão. Após o cálculo de deslocamentos será feita uma análise de como a estrutura se comporta para diferentes áreas de seção transversal. O fator, distância entre os nós também será analisado, via simulações numéricas para se determinar qual o comportamento da estrutura mediante estas variações.

Sistema estrutural analisado

Nesta seção será feita uma análise descritiva da estrutura. O sistema em questão é um elemento estrutural constituído de 25 elementos e 10 nós. A contagem é feita de cima para baixo. Dois nós estão conectados ao elemento 1, 4 nós na base intermediária e 4 nós na base-fundação, representando as reações de engastamento. Inicialmente cada um dos elementos possui área de seção transversal circular constante com diâmetro igual a $d = 0.5080$ mm. Nos nós 1 e 2 são aplicados duas forças que simulam o carregamento devido às linhas de transmissão. As intensidades são dadas, respectivamente por, $F_1 = 266,89 \text{ kN}$ e $F_2 = 266,89 \text{ kN}$, na direção do eixo z referente ao sistema de coordenadas dadas na figura (147) acima.

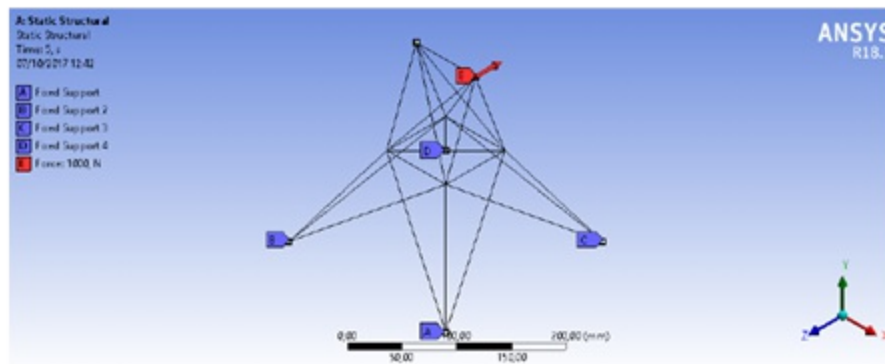


Figura 147. Elemento Estrutural em Forma de Torre Treliçada

Fonte: Próprio autor.

Após a análise preliminar da estrutura, o próximo passo será a simulação numérica variando os componentes que constituem os parâmetros estruturais do sistema. Nesta parte, começaremos o estudo levando em consideração a área da seção transversal de cada um dos elementos da estrutura. A partir destas variações faremos uma análise comparativa para vermos como o campo de deslocamentos e as reações de apoio se comportam.

O passo seguinte será a variação das forças externas que atuam na estrutura. A partir destas variações, para vermos o comportamento do campo de direções e as reações de apoio na estrutura. E finalmente, como último parâmetro a ser analisado, será considerado as tensões em cada uma dos elementos da estrutura. Nesta parte da simulação será feito uma análise entre a variação da área das seções transversais nos elementos da estrutura com a resposta das tensões nos elementos. Para o cálculo das tensões será utilizado as matrizes de rigidez de cada um dos elementos descritos na seção anterior.

Resultados numéricos

Nesta seção será feita uma análise numérica do comportamento dos elementos da estrutura de acordo com os vários tipos de parâmetros estudados na seção anterior. Começaremos nossa análise levando em

consideração os carregamentos devido às linhas de transmissão. As forças que atuam nos nós 1 e 2 são respectivamente $F_1 = 266 \text{ kN}$ e $F_2 = 266,89 \text{ kN}$, cerca de 26 toneladas em ambos os nós.

Nó	x	y	z
1	35,91717	82,78917	-95,7791
2	10,95479	134,5567	41,66967
3	0	-71,8342	-71,8342
4	-46,8719	-39,6578	82,03301
5	0	-42,7601	-114,027
6	-46,8719	-23,4361	-62,4959
Reações	Rx	Ry	Rz
7	4652,625	-9426,52	-6001,21
8	30682,58	17145	-37286,5
9	-10447,9	7068,536	15928,25
10	4888,054	4914,808	10052,21

Tabela 81. Valores de para Deslocamentos q_i (mm) e Reações de Apoio R_i (N)

Fonte: Próprio autor.

Os valores para os deslocamentos e reações de apoio estão apresentados na Tabela 81. A primeira coluna representa o deslocamento dos 6 nós contados de cima para baixo, 2 nós no topo da torre e 4 nós na base intermediária e a segunda coluna representa os valores das reações de apoio representada pelos nós 7, 8, 9 e 10, conforme pode ser visto na figura 148 abaixo.

Um fato importante que decorre da análise da tabela (81) é que os deslocamentos nos nós 1 e 2 apresentam características diferentes, mesmo sendo aplicado a mesma intensidade de forças em ambos os nós. A maior variação ocorre no nó 3 na direção z, 1,91516 mm. Por outro lado, com

relação às reações nos apoios pode ser visto que o nó mais solicitado é o 8 com reação na direção x de aproximadamente 1.8 toneladas.

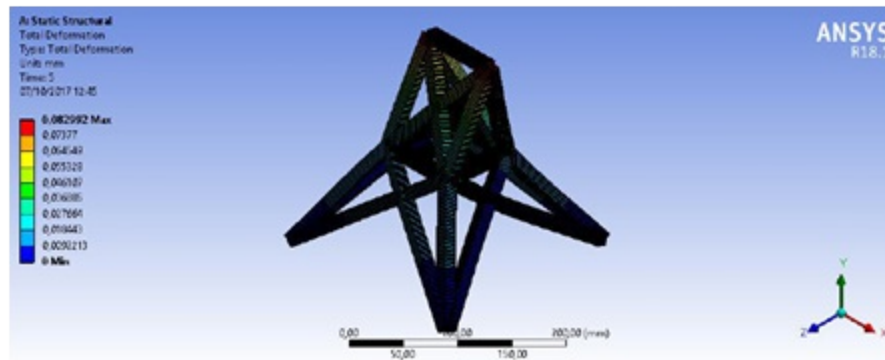


Figura 148. Análise Estrutural de Torre de Linhas de Transmissão

Fonte: Próprio autor.

A próxima análise refere-se ao caso onde as forças consideradas são de $F_1 = 269,11 \text{ kN}$ e $F_2 = 269,11 \text{ kN}$. Para esta situação os valores de deslocamento nodais e valores de reações nos nós de engastamento são dados na tabela abaixo:

Nó	x	y	z
1	35,62035	82,10494	-94,9876
2	10,86427	133,4446	41,32529
3	0	-71,2407	189,9752
4	-46,4845	-39,3299	81,35506
5	0	-42,4068	-113,085
6	-46,4845	-23,2423	-61,9796
Reações	Rx	Ry	Rz
7	4614,17	-9348,62	-5951,61
8	30429,01	17003,31	-36978,4
9	-10361,5	7010,116	15796,61
10	4847,656	4874,188	9969,129

Tabela 82. Valores de para Deslocamentos q_i (pol) e Reações de Apoio R_i (lb)

Fonte: Próprio autor.

De certa forma, conforme valores apresentados na Tabela (82), pode se ver que os deslocamentos dos nós 1 a 6 apresentaram redução. Por exemplo, o deslocamento do nó 1 na direção x diminui de 1,41 na situação de carregamento $F_1 = 266,89$ kN para 1,40, na situação de $F_1 = 266,89$ kN, o mesmo acontecendo nas demais direções, na direção y de 82,55 mm para 82,042 mm e na direção z, de -95,758 para -94,742 mm. Já para o nó 2 podemos ver uma redução de 10,922 mm para 10,668 mm. As reações de apoio também seguem a mesma tendência. Enquanto na situação de $F_1 = 266,89$ kN, o valor da reação do nó 7 na direção x é de 36,068 mm para $F_2 = 269,11$ kN o deslocamento do nó 7 na direção x é de 26,2382.

Para estudar os efeitos de variação de área consideraremos primeiro, o caso onde os carregamentos são dados por $F_1 = 266,89$ kN e $F_2 = 266,89$ kN nos nós 1 e 2 respectivamente. A área de seção transversal será de 1 mm². Para este novo valor de área a tabela a seguir mostra os valores dos deslocamentos nodais para os nós de 1 a 6 e as reações nos nós de engastamento, nós de 7 a 10.

Nó	x	y	z
1	538,7576	1241,837	-1436,69
2	164,3219	2018,35	625,0452
3	0	-1077,52	2873,375
4	-703,08	-594,865	1230,495
5	0	-641,401	-1710,4
6	-703,08	-351,541	-937,44
Reações	Rx	Ry	Rz
7	1046840	-2120964	-1350268

8	6903580	3857625	8389469
9	-2350763	1590421	3583856
10	1099813	1105832	2261746

Tabela 83. Valores de para Deslocamentos q_i (pol) e Reações de Apoio R_i (lb)

Fonte: Próprio autor.

Para o caso onde a área da seção transversal dos elementos da estrutura é de 1 mm^2 , a tabela (83) fornece os valores para os deslocamentos nodais dos vértices de 1 a 6, coluna um, e as reações nos nós de engastamento, coluna 2. Vê-se que neste caso, tanto os valores de deslocamento quanto os valores das reações mudam consideravelmente, com especial atenção para o deslocamento na direção z do nó três, que muda de 189,738 mm, para 2,87 103 mm. Os valores de tensões também sofrem alterações consideráveis. Observa-se, por exemplo, o caso das reações de apoio no nó oito, que para o caso de área igual $0,0645 \text{ mm}^2$ a tensão assume o valor de 48,852 Pa e para o caso em a área da seção transversal assume o valor de $9,67 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ o valor da tensão atinge 10,67 kN para um mesmo valor de carregamento tanto para o nó 1 quanto para o nó 2, de 266,89 kN.

Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise numérica sobre os deslocamentos e as reações de apoio em um sistema estrutural treliçado usado em linhas de transmissão. A análise levou em consideração o carregamento externo, representando neste caso o peso das linhas de transmissão. As simulações numéricas foram realizadas para diferentes tipos de carregamento e diferentes seções transversais. A análise de simulações concluiu que para o aumento de forças há uma diminuição dos deslocamentos e nas reações dos apoios fixos. Neste caso a análise numérica indica um predomínio de forças

verticais atuando na estrutura de forma a diminuir a amplitude dos deslocamentos. Por outro lado, as reações de apoio também sofrem uma diminuição nas amplitudes. Para o caso onde há um aumento da área da seção transversal nota-se um aumento na amplitude de deslocamento dos graus de liberdade. Com relação aos efeitos do aumento da área da seção transversal dos elementos nas reações de apoio, vê-se que há um aumento de resistência por parte dos elementos estruturais da torre.

Como trabalho futuro, pretende-se dar continuidade aos estudos sobre os efeitos dos parâmetros que exercem influência no campo de deslocamento da estrutura, e nas reações de apoio. O cálculo das tensões nos elementos estruturais, para diferentes tipos de carregamentos e diferentes áreas de seção transversal também serão temas de estudos futuros.

Referências

- AHMAD, M. Badruddin, PANDE, K. Pande; KRISHNA, Prem. Self-Supporting Towers Under Wind Loads. **Journal of the Structural Engineering, ASCE**, v. 110, n. 2, 1984.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC, **Manual of Steel Construction – Allowable Stress Design**, 9. ed. Chicago, 1989.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE 19-96, **Structural Applications of Steel Cables for Building**, New York, 1996.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE 10-97, **Design of Latticed Steel Transmission Structure**, Virginia, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**, Rio de Janeiro, 1988.
- BAYAR, Demirtas C. Drag Coefficients of Latticed Towers. **Journal of Structural Engineering**, v. 112, n. 2, p. 417-430, 1986.
- BATHE, Klaus-Jurgen; WILSON, Edward. Numerical Methods in Finite Element Analysis, **Prentice Hall Inc.**, New Jersey, 1976.
- BLESSMAN, Joaquim. Forças Devidas as Vento em Edificações Altas, **Carderno de Engenharia**, n. 27, CPGEC/UFRGS, 1988.

- BLESSMAN, Joaquim. **Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1998.
- BREBBIA, C. A., FERRANTE, J., Computational Methods for the Solution of Engineering Problems. 3. ed. **Pentech Press**, London, 1978.
- CARRIL JR., Célio Fontão. **Análise Numérica e Experimental do Efeito Dinâmico do Vento em Torres Metálicas Treliçadas para Telecomunicações**. 2000. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. **Dynamics of Structures**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1993.
- GUIMARÃES, Marlos José R. **Análise Estática e Dinâmica de Torres Metálicas Autoportantes**. 2000. 283 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.
- NASCIMENTO, Fernanda Otavia D. A. **Análise de Estruturas Metálicas de Torres Treliçadas Autoportantes para Telecomunicações**. 2002. 165 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SINGH, Kellen de Souza. **Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

Notas

- 104.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: rabelo@dmate.ufpe.br.
- 105.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, PPGEPP. Contato: leandoramaldes@hotmail.com.
- 106.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, PPGEPP. Contato: karlamelissaleandro@hotmail.com.
- 107.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, PPGEPP. Contato: werleyrafael2@gmail.com.

Preparação do material inicial do processo de laminação: um estudo de caso

Nayara Macedo Vinhal¹⁰⁸

Gislene da Silva Fonseca¹⁰⁹

José dos Reis Vieira de Moura Junior¹¹⁰

Resumo: Este trabalho apresenta um problema de programação da produção de uma etapa do processo de fabricação de perfis de aços por laminação. Tendo como objetivo minimizar o tempo total de execução deste processo. A etapa em estudo, se refere a preparação do material inicial (redução das dimensões de tarugos de aço) utilizado em um processo de laminação, etapa esta que pode ser descrita com um problema de programação da produção do tipo *flow shop* com restrições de *no-wait* e *setup* dependente da sequência. O método empregado para resolver este problema foi a heurística GAP, a qual pode ser facilmente implementada manualmente, além desta fornecer uma solução que respeite as restrições tecnológicas do processo de produção a ser sequenciado. A heurística implementada gerou 5 soluções distintas para este problema, sendo possível escolher a que solução que consumiu o menor tempo para concluir a execução desta etapa do processo de laminação.

Palavras-chave: Laminação. *Flow shop* com restrição *no-wait* e *setup* dependente da sequência. Heurística GAP.

Introdução

O uso e manipulação de metais é algo que ocorre desde a pré-história até a atualidade. De início, os metais eram usados apenas para criar ferramentas, lanças, e outros objetos de simples produção, no entanto, com o decorrer dos

anos, a sociedade passou por várias mudanças, e com ela veio a criação de novas tecnologias e técnicas que permitiram aprimorar e facilitar o uso e manipulação destes metais (Rizzo, 2007).

Devido a este aprimoramento, a utilização de metais é algo que se tornou recorrente no setor industrial, uma vez que estes têm grande aplicabilidade e apresentam características muito desejadas em diversos segmentos industriais. Característica estas que compreende a obtenção de uma forma específica desejada do metal, apresentar propriedades que podem ser controladas e que possui custo condizente com a sua utilização (Rizzo, 2007).

A utilização de metais em processos de fabricação requer que os mesmos passem por algumas modificações provenientes de procedimentos específicos os quais irão lhe atribuir forma, dimensão e/ou acabamento. Procedimento estes que podem ser classificados em cinco categorias segundo Rizzo (2007): moldagem, corte ou separação, união ou acoplamento, recobrimento ou enobrecimento, modificação de propriedades.

Dentre estes procedimentos, tem-se o processo de fabricação por laminação, o qual é um processo de conformação mecânica que está enquadrado na categoria de moldagem. Neste processo, o material metálico é submetido a passar entre dois cilindros, e esta passagem provoca a alteração na forma (espessura, largura e comprimento) do material (Rizzo, 2007).

Neste trabalho, será explorada uma etapa específica do processo de laminação do aço para a fabricação de perfis, etapa esta, que corresponde a programação da produção que forneça o menor tempo de preparação do material inicial que irá ser laminado. Esta preparação se refere ao processo responsável pela redução das dimensões de um conjunto (lotes de produção) de tarugos de aço de tamanhos diferentes, quando estes passam por uma quantidade determinada de cadeiras de laminação antes do processo de laminação começar.

Independente de qual lote de tarugos que irá ser processado para ter suas dimensões reduzidas, todos os lotes possuem a mesma sequência de produção. E como este processo é contínuo e possui lotes com tarugos de tamanhos diferentes, logo cada lote deve ser processado ininterruptamente e as cadeiras de laminação devem ser ajustadas de acordo com os tamanhos dos tarugos. Portanto, o processo de redução da dimensão dos tarugos de aço nas cadeiras de laminação pode ser representado como sendo um problema de programação e sequenciamento da produção do tipo *flow shop*, com restrições tecnológicas do tipo *no-wait* e com tempos de *setup* dependente da sequência.

O método escolhido (heurística GAP) para realizar a programação da sequência de produção do problema em estudo, foi apresentado por Araújo e Nagano (2009). Com este método é possível realizar a programação da produção do processo de redução das dimensões dos tarugos, levando em consideração as restrições tecnológicas envolvidas neste processo de forma eficiente, além de apresentar uma solução viável para o problema.

1. O processo de laminação como um problema de programação da produção

O processo de laminação consiste em conferir forma a um metal por meio da passagem deste metal entre cilindros que giram em direções opostas com a mesma velocidade, e a quantidade de etapas de um processo de laminação depende das especificações estipuladas do produto final. Especificações estas que, garante forma e dimensão ao produto, e também a melhoria das propriedades mecânicas do metal usado no processo, conforme os requisitos de normatização do produto (Rizzo, 2007).

O processo de laminação, segundo Rizzo (2007), tem como principais etapas:

- A preparação do material inicial a ser laminado;

- Aquecimento do material inicial;
- Laminação a quente;
- Acabamento e/ou tratamento térmico (caso seja produto final);
- Decapagem;
- Laminação a frio (se necessário);
- Tratamento térmico;
- Acabamento e revestimento

O material a ser laminado pode ser advindo de lingotamento convencional ou contínuo (em forma de placas, blocos e tarugos). O material a ser escolhido para o processo de laminação depende do tipo e a especificação que o produto final deve apresentar (Rizzo, 2007).

Após a escolha do material ser realizada, este material será aquecido e será encaminhado para a primeira etapa do processo de laminação (preparação do material inicial). Esta preparação é responsável por ajustar a dimensão (redução de espessura e/ou modificação da largura e comprimento) do material inicial para as próximas etapas do processo. Este ajuste se dá através da passagem do material por uma ou mais cadeiras de laminação. Depois de passar por esta etapa, o material é aquecido novamente e é dada a continuidade do processo de laminação até o mesmo receber um acabamento adequado (Rizzo, 2007).

Este tipo de processo de fabricação é adequado para a produção em série, pois a diversificação dos modelos a serem produzidos é pequena e estes geralmente são processados em lotes. Outro aspecto que torna este processo adequado para a produção em série, é que o custo com ferramentas (cilindros de laminação) e a adequação da linha de produção para este tipo de processo de fabricação é elevado, logo, quanto maior o lote e menor for a quantidade de modelos, menor será o custo do produto final (Rizzo, 2007).

Como os gastos envolvidos em uma linha de produção de uma indústria é muito alto, uma forma de tentar reduzir estes gastos é fazer o planejamento do processo de produção, o que permite um melhor controle da utilização dos recursos desta linha de produção. Ao planejar o processo de produção, é possível fazer a programação da produção do mesmo, e ao realizar esta programação é possível determinar e simular qual é a melhor forma de executar um processo de produção, com o menor custo e desperdício de recursos possíveis (Slack et al., 2009).

2. Formulação do estudo de caso

O objetivo do presente trabalho é determinar a programação da produção que forneça o menor tempo para preparar o material inicial (lotes de tarugos de aço com tamanhos diferentes) do processo de fabricação de perfis de aço por meio da laminação.

O processo de preparação deste material implica na redução das dimensões dos tarugos de aço quando estes passam por cadeiras de laminação. Esse processo de preparação apresenta algumas restrições com relação ao seu processo de produção, que devem ser consideradas ao realizar a programação da produção, restrições estas que são:

- Como há lotes de tarugos de tamanhos diferentes, as cadeiras de laminação as quais eles deveram passar, necessitam ser ajustadas (modificar a distancias entre os cilindros) de acordo com as dimensões dos tarugos que serão laminados;
- Como o processo de laminação é classificado como sendo um processo contínuo, logo, todos os tarugos de determinado lote devem ser processados de forma ininterrupta.

Ao representar esta etapa do processo de laminação como sendo um problema de programação da produção, temos:

- Χαδα λοτε δε ταρυγο δε δετερμιναδο ταμανηο Γ ρεπρεσενταδο χομο υμα ταρεφα (ου φοβ) α σερ προχεσσαδα;
- Χαδα χαδειρα δε λαμινα| ©ο Γ ρεπρεσενταδα χομο υμα μ(θυινα;
- Χομο ο προχεσσο δε ρεδυ| ©ο δε διμενσ©ο δοσ ταρυγοσ ρεθυερ θυε οσ μεσμοσ πασσεμ πελο μεσμο προχεσσο δε προδυ| ©ο, εστα εταπα δο προχεσσο δε λαμινα| ©ο ποδε σερ ρεπρεσενταδα χομο σενδο υμ προβλεμα δε προγραμα| ©ο δα προδυ| ©ο δε αμβιεντε φλωω σηοπ, ποισ, υμ προβλεμα δε φλωω σηοπ Γ δεσχριτο χομο σενδο υμ χονφυντο δε φοβσ θυε σ©ο προχεσσαδοσ να μεσμα σεθυ| νχια πορ υμ χονφυντο δε μ(θυινασ εμ σΓριε. Νοτα| ©ο παδρ©ο: Fm, ονδε F ινδιχα σερ υμ προβλεμα δε φλωω σηοπ ε m α θυαντιδαδε δε μ(θυινα ενπολπιδασ νο προχεσσο δε προδυ| ©ο (Πινεδο, 2012);
- Χομο οσ λοτεσ δε ταρυγοσ δεπεμ σερ προχεσσαδοσ δε φορμα ινιντερρυπτα, ο προβλεμα δε προγραμα| ©ο δα προδυ| ©ο απρεσεντα α ρεστρι| ©ο τεχνολ Γγιχα νο-ωαιτ, ποισ εστα ρεστρι| ©ο ιμπλιχα θυε υμ φοβ ν©ο ποδε φιχαρ εμ εσπερα εντρε δυασ μ(θυινασ συχεσσιπασ, ου σεφα, ο τεμπο δε ιν Γχιο δε υμ φοβ ποδε σερ αδιαδο παρα γαραντιρ θυε εστε φοβ ν©ο πρεχισε εσπεραρ παρα σερ προχεσσο εμ αλγυμα μ(θυινα δο φλυξο δε προδυ| ©ο. Νοτα| ©ο παδρ©ο: νωτ (Πινεδο, 2012);
- Χομο ασ χαδειρασ δε λαμινα| ©ο δεπεμ σερ αφυσταδασ θυανδο α ∅ μυδαν| α δο λοτε δε ταρυγοσ α σερεμ προχεσσαδοσ, τεμ-σε υμ τεμπο θυε Γ ατριβυ Γδο νο προχεσσο δε προδυ| ©ο απενασ παρα φαζερ εστεσ αφυστεσ. Εστε τεμπο θυε Γ ρεσερπαδο παρα φαζερ οσ αφυστεσ Γ ρεπρεσενταδο χομο α ρεστρι| ©ο τεχνολ Γγιχα δε σετυπ δεπενδεντε δα σεθυ| νχια. Νοτα| ©ο παδρ©ο: sij^k, ονδε σ Γ ο τεμπο ατριβυ Γδο παρα φαζερ ο αφυστε να μ(θυινα k, θυανδο ο φοβ ιτερμινα δε σερ προχεσσαδο, παρα θυε ο job j ποσσα σερ προχεσσαδο να σεθυ| νχια (Πινεδο, 2012);
- Χομο ο οβφετιπο δο τραβαληο Γ φορνεχερ ο μενορ τεμπο δε προχεσσαμεντο παρα πρεπαραρ ο ματεριαλ ινιχιαλ δο προχεσσο δε λαμινα| ©ο, λογο, α φυν| ©ο οβφετιπο δο προβλεμα Γ α μινιμιζα| ©ο δο μακεσπαν, θυε ρεπρεσεντα ο μενορ τεμπο παρα α

χρονήλιο το προχρησιμοποιημένο δε τοδοσ οσ φοβσ. Νοτα το
 παδρ: C_{max} .

Portanto, o problema retratado acima pode ser descrito como um conjunto de n tarefas ($J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$) a serem processadas por um conjunto de m máquinas ($M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$), mediante a um tempo de processamento p_{ij} (onde p_{ij} é o tempo de processamento da tarefa j na máquina i), de modo que todas as n tarefas sejam processadas sem interrupção e na mesma sequência pelas m máquinas que estão dispostas em série.

Como o problema em estudo está considerando a programação da produção de 5 lotes de tarugos (*jobs*) em duas cadeiras de laminação (máquinas), logo, ao colocar o problema na notação padrão (Ambiente de produção (quantidade de máquinas) | restrições tecnológicas | função objetivo) de um problema de programação da produção (Alharkan, 2011), temos:

- $J = \{J_1, J_2, J_3, J_4, J_5\}$
- $M = \{M_1, M_2\}$
- $(F_2 | nwt, s_{ij}^k | C_{max})$

Abaixo estão as figuras que ilustra o problema em estudo (Figura 149 e 150) e as tabelas com os tempos de processamento dos *jobs* (Tabela 84) e tempos de setup para as duas máquinas (Tabela 85 e 86).

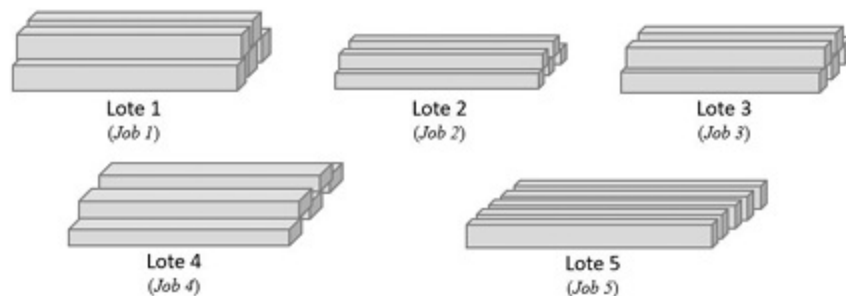


Figura 149. Cinco lotes de tarugos de aço com dimensões diferentes

Fonte: Autores, 2017.

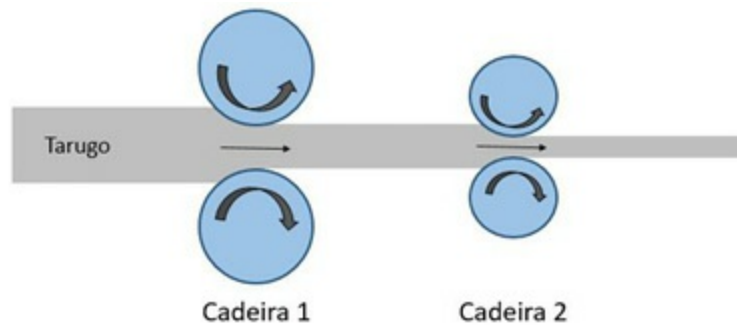


Figura 150. Processo de conformação mecânica com duas cadeiras de laminação

Fonte: Autores, 2017.

	Job 1	Job 2	Job 3	Job 4	Job 5
	240	240	360	420	600
	300	360	480	540	720

Tabela 84. tempos de processamento (em minutos) dos jobs

Fonte: Autores, 2017.

	J1	J2	J3	J4	J5
J1	-	40	40	50	60
J2	20	-	50	60	90
J3	20	50	-	50	80
J4	30	40	40	-	70
J5	50	90	70	30	-

Tabela 85. Tempos de *setup* (em minutos) da máquina 1

Fonte: Autores, 2017.

	J1	J2	J3	J4	J5
J1	-	20	20	25	30

J2	10	-	25	30	45
J3	10	25	-	25	40
J4	15	20	20	-	35
J5	25	45	35	15	-

Tabela 86. tempos de *setup* (em minutos) da máquina 2

Fonte: Autores, 2017.

3. Heurística GAP

O funcionamento do método da heurística GAP – que é voltada para problemas de programação da produção do tipo $(F_m|nwt, s_{ij}^k|C_{max})$ – a qual foi proposta por Araújo e Nagano (2009) está descrita nas Figuras 151 e 152, logo abaixo.

Passo 1: $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}, \sigma \leftarrow \{\emptyset\}$

Passo 2: Enquanto $J \neq \emptyset$, fazer:

Passo 2.1: Calcule o custo total na última máquina para todas as possíveis inserções em σ de cada tarefa $J_i \in J$, sendo h a posição relativa de inserção.

Passo 2.2: Escolha a tarefa $J_i \in J$, que forneça o menor custo total na última máquina.

Passo 2.3: Insira esta tarefa na posição h da sequência σ .

Passo 2.4: $J \leftarrow (J - J_i)$

Figura 151. Pseudocódigo da heurística GAP

Fonte: ARAÚJO E NAGANO, 2009, p. 160. Adaptado pelos autores.

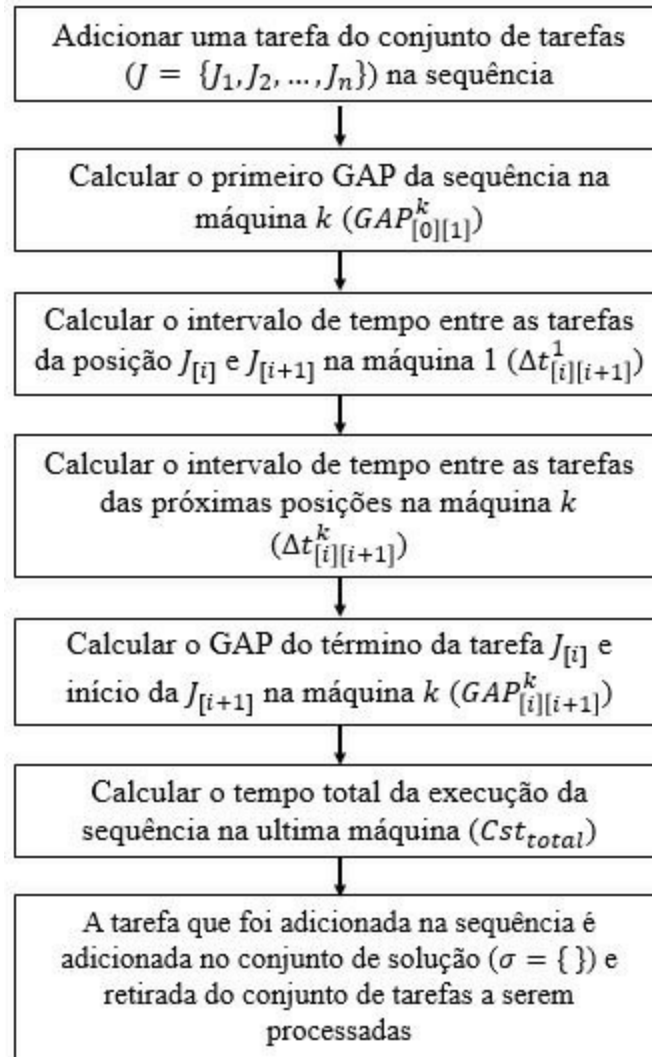


Figura 152. Como é realizada a inserção de uma tarefa na sequência

Fonte: Autores, 2017.

Para calcular o que foi proposto na heurística, temos as seguintes equações:

$$GAP_{[j][1]}^k = \sum_{h=1}^{k-1} p_{h[1]} \quad (1)$$

$$\Delta t_{[i][i+1]}^1 = \max_{1 \leq k \leq m} \left[s_{[i][i+1]}^k + \sum_{h=i}^k (p_{h[i]} - p_{h[i+1]}) + p_{k[i+1]} \right] \quad (2)$$

$$\Delta t_{[i][i+1]}^k = \Delta t_{[i][i+1]}^1 + \sum_{h=1}^{k-1} (p_{h[i+1]} - p_{h[i]}) \quad (3)$$

$$GAP_{[i][i+1]}^k = \Delta t_{[i][i+1]}^k - p_{k[i]} \quad (4)$$

Sobre as variáveis do método:

- $Ph[1]$, $Ph[i]$, $Ph[i+1]$, $Pk[i+1]$, $Pk[i]$, $P(k[n])$: são os tempos de processamento das tarefas que foram adicionados na sequência do processo de produção, as quais variam no decorrer do método;
- $s_{[i][i+1]}^k$: tempo de setup entre as tarefas da posição $J([i])$ e $J([i+1])$ na máquina k ;
- $\Delta t_{[i][i+1]}^1$: calcula o maior espaço de tempo do fim da tarefa na posição $J_{-}([i])$ e início da tarefa na posição $J([i+1])$ para a máquina 1. O cálculo da (Eq. 2) é realizado m vezes, e o resultado desta equação é o valor máximo encontrado;
- $\sigma = \{J[i], J[i+1], \dots, J[n]\}$: conjunto que possui a solução da sequência de execução das atividades do problema de programação da produção, onde $J[]$ representa a tarefa que está na i -ésima posição da sequência de execução.

4. Discussão e resultados

Ao realizar a programação da produção utilizando a heurística GAP, que foi implementada manualmente, com a finalidade de minimizar o tempo de

preparo do material inicial do processo de fabricação de perfis de aço usando a heurística GAP, foi obtido os seguintes resultados:

- Adição do primeiro lote de tarugos na sequência:

Sequência	C _{max} (minutos)	C _{max} (horas)
J1	540	9

Tabela 87. Adição do primeiro *job* (J1)

Fonte: Autores, 2017.

- Adição do segundo lote de tarugos na sequência em todas as possíveis posições:

Sequência	C _{max} (minutos)	C _{max} (horas)
J2>J1	910*	15:10*
J1>J2	920	15:20

Tabela 88. Adição do segundo *job* (J2)

Fonte: Autores, 2017.

- Adição do terceiro lote de tarugos na sequência (sequência que forneceu o menor tempo execução da iteração anterior, J2>J1) em todas as possíveis sequencias:

Sequência	C _{max} (minutos)	C _{max} (horas)
J3>J2>J1	1535	25:35
J2>J3>J1	1440*	24*
J2>J1>J3	1490	24:50

Tabela 89. Adição do terceiro *job* (J3)

Fonte: Autores, 2017.

- Adição do quarto lote de tarugos na sequência (sequência que forneceu o menor tempo execução da iteração anterior, J2>J3>J1) em todas as possíveis sequencias:

Sequência	C _{max} (minutos)	C _{max} (horas)
J4>J2>J3>J1	2180	36:20
J2>J4>J3>J1	2070	34:30
J2>J3>j4>J1	2010*	33:30*
J2>J3>j1>J4	2150	35:50

Tabela 90. Adição do quarto job (J4)

Fonte: Autores, 2017.

- Adição do quinto lote de tarugos na sequência (sequência que forneceu o menor tempo execução da iteração anterior, J2>J3>J4>J1) em todas as possíveis sequencias:

Sequência	C _{max} (minutos)	C _{max} (horas)
J5>J2>J3>J4>J1	3085	51:25
J2>J5>J3>J4>J1	3045	50:45
J2>J3>J5>J4>J1	2920	48:40
J2>J3>J4>J5>J1	2870*	47:50*
J2>J3>J4>J1>J5	3090	51:30

Tabela 91. Adição do quinto job (J5)

Fonte: Autores, 2017.

A sequência que forneceu o melhor resultado (ilustrado na Figura 153) foi a que gastou 2870 minutos para finalizar o processo.



Figura 153. Sequência de produção que apresentou o menor makespan

Fonte: Autores, 2017.

Considerações finais

Através da representação de um processo de fabricação como um problema de programação da produção, é possível analisar vários aspectos do sistema de produtivo de uma linha de produção, como por exemplo: quais são os recursos que estão sendo utilizado (operários, maquinário, matéria-prima, e etc.), programar a sequência de execução das atividades que devem ser processadas, sem ser necessário fazer testes de sequenciamento na linha de produção real, testar novos métodos de solução que represente de forma mais real possível o que está sendo produzido, dentre outros.

No presente trabalho, uma das etapas pertencente ao processo de fabricação de perfis de aço por laminação, foi representada como um problema de programação da produção do tipo *flow shop* com restrições de *setup* e *no-wait*, e com função objetivo de minimização do *makespan*. O método elegido para encontrar a solução do problema foi a heurística GAP. Ao aplicar a heurística no problema do estudo de caso, foi encontrada a solução que forneceu o menor tempo para o processamento de todos os lotes de tarugo, sequência está que leva 2870 minutos (equivalente a 47:50 horas) para ser executada, além de constatar que este método pode ser facilmente implementado manualmente, embora sua resolução seja extensa.

Como proposta para trabalhos futuros, pode-se considerar fazer a programação da produção de uma quantidade maior de etapas do processo de fabricação, aumentar a quantidade de *jobs* a serem processados, adicionar outras restrições ao problema, buscar outros métodos de solução e realizar a comparação entre os métodos.

Referências

- ALHARKAN, Ibrahim M. **Algorithms for sequencing and scheduling**. Riyadh: Industrial Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, 2011. Disponível em: <<http://bit.ly/2pg6Bt5>>. Acesso em: 05 jul. 2017.
- ARAÚJO, Daniella Castro; NAGANO, Marcelo Seido. Um eficiente método heurístico construtivo para o problema *no-wait flowshop* com tempos de setup dependentes da sequência. **Revista Gestão Industrial**, Paraná, v. 5, n. 4, p. 152-167, 2009.
- PINEDO, Michael L. **Scheduling: theory, algorithms and systems**. 4. ed. Nova York: Springer, 2012.
- RIZZO, Ernandes Marcos da S. **Processo de laminação dos aços: uma introdução**. São Paulo: ABM, 2007.
- SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

Notas

- 108.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: nayara.macedov@gmail.com.
- 109.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Bolsista CNPq. Contato: gis-sf@hotmail.com.
- 110.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: zereis@ufg.br.

Métodos heurísticos para problema de programação da produção flow shop permutacional com tempos de processamento

Gislene da Silva Fonseca¹¹¹

Nayara Macedo Vinhal¹¹²

José dos Reis Vieira de Moura Júnior¹¹³

Resumo: Este trabalho apresenta um problema de programação da produção em um ambiente *Flow shop* permutacional de um processo de laminação contendo um conjunto de 4 máquinas e 5 tarefas (*jobs*). Diante disto, teve como objetivo realizar o sequenciamento da produção a fim de minimizar a duração total da produção (*makespan*). Para tanto, foram aplicados dois métodos heurísticos, Gupta e CDS (Campbell, Dudek e Smith). Inicialmente foi feita uma pequena introdução à programação da produção e ao ambiente *Flow shop*, em seguida uma breve revisão bibliográfica a cerca do tema e das heurísticas. Posteriormente, iniciou com a explicação das heurísticas, seus respectivos passos para ser resolvido e a elaboração de um exemplo numérico de cada uma. Os resultados mostraram que as duas heurísticas propostas apresentaram os mesmos resultados, podendo assim, as duas serem utilizadas para a redução do *makespan*.

Palavras-chave: *Flow shop*. Tempo de processamento. Método heurístico.

Introdução

De acordo com Pinedo (2012), no ambiente competitivo atual, o sequenciamento e a programação da produção tornam-se uma necessidade de sobrevivência no mercado, pois os recursos e as tarefas estão cada vez mais escassos. Assim, as técnicas de programação lidam com a destinação desses recursos num período de tempo, sendo um método de tomada de decisão. A aplicação dessa técnica proporciona um resultado satisfatório, podendo assim otimizar os recursos, melhorar o sistema para cumprir datas de entregas e proporcionando tempos de produção menores para o processamento de todas as tarefas.

Segundo Slack et al. (2009), a atividade de programação da produção é uma das mais complexas atividades de gestão da produção, pois os programadores precisam lidar com diversos tipos diferentes de recursos simultaneamente, pois máquinas têm capacidades para processamento e também pessoas com diferentes habilidades para ajudar na produção. De modo que, quanto mais aumenta o número de tarefas e de processos, os números de programações possíveis aumentem também. Ou seja, para n tarefas existem $n!$ maneiras diferentes de programar as tarefas em um processo simples

O problema de programação da produção em um ambiente *Flow Shop* é caracterizado por n tarefas, que devem ser processadas por um conjunto de m máquinas distintas, tendo o mesmo fluxo de processamento nas máquinas. Um caso específico de programação *flow shop*, denominado permutacional, é quando em cada máquina possuem a mesma rota de processamento das tarefas. A solução do problema consiste em determinar dentre as sequências possíveis das tarefas aquela que aperfeiçoe uma determinada medida de desempenho, e uma das mais utilizadas é a duração total da produção (*makespan*) (Nagano et al., 2012).

Baseando-se em dados reais de processos de fabricações distintos de uma siderúrgica multinacional (não podem ser apresentados aqui por motivos de

sigilo industrial), foi determinado um conjunto de dados fictícios. Assim, realizar o estudo de diferentes métodos que forneçam resultados satisfatórios em termos de tempo de processamento e solução ótima para o problema de sequenciamento das tarefas de um processo de laminação.

Logo, o caso em estudo pode ser descrito como um problema de programação da produção do tipo *flow shop* permutacional, que utiliza os tempos de processamentos das atividades para definir qual a sequência que minimiza a duração total da produção (*makespan*).

Os métodos utilizados neste trabalho são as heurísticas de Gupta e CDS (Campbell, Dudek e Smith), uma vez que estas são adequadas para resolver problemas de programação da produção para este tipo de ambiente com consideração de tempos de processamento. Sendo que atualmente a empresa em questão não utiliza essas heurísticas para solução de problemas de programação da produção.

1. Referencial teórico

1.1 Programação da Produção

De acordo com Alharkan (2011), a definição geral de um problema de sequenciamento é quando há m máquinas $\{M_1, M_2, \dots, M_k, \dots, M_m\}$ disponíveis e n tarefas $\{J_1, J_2, \dots, J_j, \dots, J_n\}$ a serem processadas, onde cada tarefa deve ser processada através das máquinas em uma ordem específica que satisfaça as restrições tecnológicas do trabalho. Assim, um problema de programação da produção tem a finalidade de gerar uma sequência que satisfaça as seguintes condições: i) todas as tarefas devem ser processadas; ii) todas as restrições são atendidas por todas as tarefas, e iii) todos os critérios que foram selecionados são otimizados.

Segundo Baker (1974), a programação da produção consiste na destinação de recursos ao longo de um período de tempo para executar um grupo de tarefas. Para Pinedo (2012), o sequenciamento da produção é uma forma de

tomada de decisão que exerce uma função crucial na produção de produtos, bem como indústria de serviços e entre outras.

Em outras palavras, um problema de programação da produção constitui em determinar uma ordem ou sequência em que as máquinas processarão as tarefas (*jobs*) de modo a otimizar qualquer medida de desempenho (Pinedo, 2012).

De acordo com Pinedo (2012), um problema de programação da produção está descrito de acordo com a seguinte forma $\alpha | \beta | \gamma$, onde α descreve o ambiente da máquina e contém apenas uma entrada, β fornece detalhes das características de processamento e das restrições e o γ descreve o objetivo a ser alcançado, que são as medidas de desempenho. Os ambientes de programação são classificados em:

- **Máquina única:** há apenas uma única máquina para processar todas as tarefas.

- **Máquinas paralelas:** existem m máquinas idênticas em paralelo, sendo que cada tarefa pode ser executada em qualquer uma das máquinas.

- **Flow shop:** existem m máquinas em série, onde cada tarefa deve ser processada obedecendo a um mesmo roteiro.

- **Flow shop permutacional:** existem m máquinas em série, onde a ordem de processamento das tarefas em cada máquina é exatamente a mesma.

- **Job shop:** existem m máquinas, mas cada tarefa tem sua própria rota de processamento predeterminada a seguir.

- **Open shop:** Existem m máquinas, mas cada tarefa deve ser processada novamente em cada uma das máquinas, sendo que não há restrições quanto ao roteamento de cada tarefa através do ambiente de máquina. Então, pode determinar a rota para cada tarefa e diferentes tarefas podem ter rotas diferentes.

De acordo com Pinedo (2012) e Fernandes et al. (2010), as restrições de processamento especificadas no campo β , podem ser caracterizadas como:

- Data de liberação ou disponibilidade de cada tarefa (r_j);
- Data que a tarefa finaliza o processo (d_j);
- tempo de processamento de cada tarefa em cada máquina (p_{jk});
- Tempo de setup da tarefa na máquina (s_{jk});
- Tempo de espera para iniciar a tarefa (W_{ik});
- As operações podem ser interrompidas (prmp);
- As tarefas podem visitar uma máquina mais de uma vez (recrc);
- A solução deve ser uma programação permutacional (prmu);
- As máquinas podem ficar indisponíveis (brkdwn);
- Bloqueio, onde indica que existe uma capacidade finita de armazenamento temporário (buffer) entre duas máquinas.

O objetivo a ser minimizado γ é sempre uma função dos tempos de conclusão das tarefas, podendo ser classificados como:

- Tempo total quando a última tarefa acabar de ser processada ($C_{m\acute{a}x}$);
- Tempo total de fluxo ($\sum F_j$);
- Atraso máximo de uma tarefa ($T_{m\acute{a}x}$);
- Atraso total de uma tarefa em processamento ($\sum T_j$);
- Tempo gasto para finalizar uma tarefa ($\sum C_j$);
- Total de tarefas atrasadas ($\sum u_j$);
- Maior desvio de pontualidade ($L_{m\acute{a}x}$);
- Número de tarefas atrasadas (n_T);

De acordo com Alharkan (2011), a programação da produção deve garantir que todas as tarefas devem ser processadas sem ocorrer sobreposição, todas as restrições do problema devem ser respeitadas e os critérios selecionados para a função objetivo devem ser otimizados.

De acordo com Baker (1974), existem três tipos comuns de objetivos de tomada de decisão em problemas de sequenciamento e programação da produção: utilização eficiente dos recursos, resposta rápida às demandas e conformidade com os prazos prescritos.

Utilização eficiente dos recursos: é programar as atividades de modo a manter um alto aproveitamento do trabalho, equipamentos e espaço.

Resposta rápida às demandas: o sequenciamento deve permitir que as tarefas sejam processadas de forma rápida, resultando em baixos níveis de inventário de tarefas em processo.

Conformidade com os prazos prescritos: o sequenciamento simplificado garante que as datas de vencimento sejam cumpridas a cada momento através de prazos de entrega mais curtos.

1.2 Gráfico de Gantt

Uma das ferramentas usualmente utilizadas na programação da produção é o Gráfico de Gantt, inventado por H. L. Gantt em 1917 e que representa graficamente o tempo de processamento em barra. As vantagens dos gráficos de Gantt é que eles proporcionam uma representação visual simples do que ocorre em cada operação, facilitando o entendimento da programação (Slack et al., 1999). A Figura 154 mostra um exemplo de Gráfico de Gantt com os tempos de processamento referente a cada tarefa (j) em 3 máquinas.

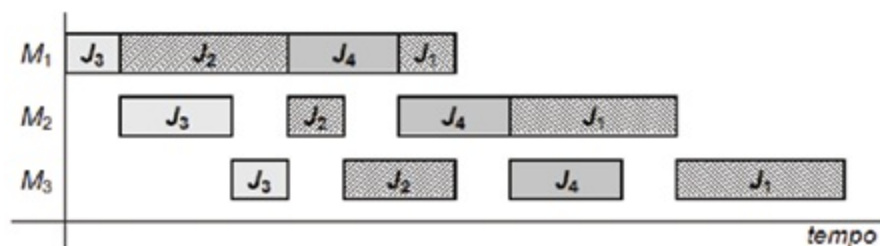


Figura 154. Exemplo com três máquinas em série e quatro tarefas

Fonte: Fuchigami, 2016.

1.3 Processo de Laminação

Segundo Rizzo (2007), um processo de laminação é composto por um conjunto de cadeiras, onde o produto move-se por muitos cilindros de laminação que deformam gradualmente o produto semiacabado até a forma esperada (final).

Em um processo de laminação existem alguns estágios essenciais para adquirir produtos laminados. Primeiramente realiza a preparação do material, onde os tarugos com formato longo, são aquecidos e em seguida irão para os trens de laminação, que contém diversas cadeiras de laminação, na qual cada cadeira terá um ajuste diferente para receber o tarugo. Concluindo, no processo a quente, o material terá o acabamento e/ou tratamento térmico quando se refere a um produto final. Em seguida, a decapagem, e se necessário uma laminação a quente, depois um tratamento térmico e por fim acabamento e revestimento, produzindo produtos finais como chapas grossas, bobinas a quente, chapas finas, barras, fio-máquina e bobinas a frio (Rizzo, 2007).

Num processo de laminação, existem muitas cadeiras na forma de um trem de laminação e essas cadeiras são dispostas dependendo do programa de laminação, no número de passagens necessárias para um determinado produto, na capacidade de produção e no tipo de produto a ser produzido. Em função destes fatores, surgiram diversas disposições de cadeiras, como, trem simples, ou seja, uma cadeira de laminação, trem aberto ou em linha, em série, contínuo, semi-contínuo, zig-zague, alternado e múltiplo (Rizzo, 2007).

Algumas cadeiras mais usadas é a do tipo contínuo que é colocada uma após a outra na mesma linha, com os cilindros girando no mesmo sentido e com um afastamento entre as cadeiras, com as cadeiras assim, o material é trabalhado ao mesmo tempo em várias cadeiras de laminação e cuja velocidade aumenta proporcionalmente para compensar a redução da seção. E um processo de trem múltiplo, utiliza apenas um trem desbastador e um ou

dois intermediários e dois acabadores. Assim, um trem múltiplo pode laminar duas barras simultaneamente no trem desbastador e também ser distribuída uma barra para cada trem intermediário ou acabador (Rizzo, 2007).

2. Heurísticas clássicas

Para o desenvolvimento desse trabalho, serão descritas e classificadas duas heurísticas presentes na literatura cujo objetivo é a minimização do tempo total da produção (*makespan*) utilizando os tempos de processamento e que serão aplicadas a um exemplo com dados similares aos reais de um universo de produção siderúrgica. Espera-se que os resultados obtidos dos dados simulados possam demonstrar a viabilidade do uso das heurísticas para o problema em questão, e assim serem apresentadas abordagens de solução de programação da produção de chão de fábrica à empresa inicialmente descrita de forma alternativa ao que é praticado atualmente.

O primeiro método heurístico proposto para a redução total da produção (*makespan*) é a heurística de Gupta. Um método heurístico que tem a notação $F_m || C_{max}$ e que será resolvido através da Eq. (1) (Correa, 2011).

$$A_j = \frac{e_j}{\min_{1 \leq k \leq l} \{p_{jk} + p_{j(k+1)}\}}, \text{ onde } e_j = \begin{cases} -1 & \text{se } p_{j1} < p_{jm} \\ 1 & \text{se } p_{j1} \geq p_{jm} \end{cases} \quad (1)$$

De acordo com a Eq. (1), os resultados de A_j serão sequenciados pelas tarefas em ordem crescente, e se caso houver um empate, a tarefa que estiver a menor soma total dos tempos de processamento é colocada primeiro (Correa, 2011).

O segundo método heurístico proposto é o CDS, desenvolvido por Campbell, Dudek e Smith é um dos métodos mais importantes para a programação em ambientes *flow shop*. Sua resolução se baseia na utilização do Algoritmo de Johnson e que obtém $m-1$ sequências possíveis, podendo assim, escolher a sequência de melhor resultado (Correa, 2012).

Para resolver à heurística CDS em um problema de programação da

produção original com todas as máquinas e as tarefas (*jobs*), primeiramente terá que transformar através das seguintes fórmulas abaixo em um problema com apenas duas máquinas, obedecendo algumas Etapas, onde terá (m-1) sequências possíveis.

- $p'_{j1} = \sum_k^h = 1 p_{jk}$ – Somatória dos tempos de processamento referente às máquinas (k) e aos jobs (j) (conhecido como Máquina 1 do problema fictício).
- $p'_{j2} = \sum_k^h = 1 p_{j(m-k+1)}$ – Somatória dos tempos de processamento referente às máquinas (k) e aos jobs (j) (conhecido como Máquina 2 do problema fictício).

Durante a resolução da Heurística de CDS, o presente trabalho seguirá 3 etapas, que é definido da seguinte forma:

- Etapa 1: Através do problema original, será considerado a primeira e a última máquina e as outras máquinas serão desconsideradas.
- Etapa 2: Somatória da primeira e segunda máquina e da última e penúltima máquina.
- Etapa 3: Somatórias da primeira, segunda e terceira máquina e da última, penúltima e da antepenúltima máquina.

Depois que o problema estiver com duas máquinas fictícias, será aplicado às regras do Algoritmo de Johnson dentro de cada Etapa falada anteriormente. Primeiramente, é definido um valor mínimo entre todos os tempos de processamento $\{p_{jk}\}$. Se o valor mínimo dos tempos de processamentos estiver na Máquina 1, a tarefa é colocada na primeira posição, e se a tarefa estiver na Máquina 2, ela será colocada na última posição livre e assim sucessivamente até todas as tarefas serem colocadas, no final obtendo uma sequência de tarefas a serem processadas (Alharkan, 2011).

3. Discussão e resultados

Neste trabalho é apresentado um problema de programação da produção em um processo de laminação de tarugos, onde serão aquecidos e posteriormente irão passar por cadeiras de laminação. Com isso, será analisado o tempo total que as cadeiras de laminação gastam para produzir todas as tarefas (tarugos), a fim de minimizar a duração total da produção (*makespan*).

Assim, para cada processo nas cadeiras de laminação os tarugos (*jobs*) possuem um tempo para serem processados. No caso em estudo, serão considerados 5 tipos de tarugos (*jobs*), que serão laminados em 4 tipos de cadeiras de laminação (máquinas), conforme mostrado na Tabela 92.

JOB	J1	J2	J3	J4	J5
M1	8	2	9	8	5
M2	4	6	7	4	6
M3	4	6	8	3	9
M4	6	5	4	5	7

Tabela 92. Dados do tempo de processamento (minutos)

Fonte: Autores, 2017.

No início do estudo, o *makespan* era de 54 minutos, como mostra o Gráfico de Gantt, Figura 155.

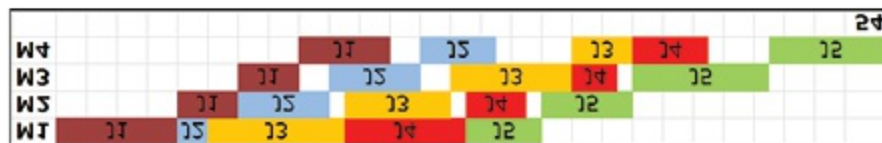


Figura 155. Gráfico de Gantt inicial

Fonte: Autores, 2017.

Para a primeira proposta de resolução do problema, começou com a heurística de Gupta, onde ela apresenta apenas um passo para ser resolvido e para ficar de fácil entendimento a Eq. (1) foi resolvida por partes, começando com a seguinte equação: $p_{jk} + p_{j(k+1)}$.

Para J1:

$$p_{11} + p_{12} = 8 + 4 = 12$$

$$p_{12} + p_{13} = 4 + 4 = 8$$

$$p_{13} + p_{14} = 4 + 6 = 10$$

Para J2:

$$p_{21} + p_{22} = 2 + 6 = 8$$

$$p_{22} + p_{23} = 6 + 6 = 12$$

$$p_{23} + p_{24} = 6 + 5 = 11$$

Para J3:

$$p_{31} + p_{32} = 9 + 7 = 16$$

$$p_{32} + p_{33} = 7 + 8 = 15$$

$$p_{33} + p_{34} = 8 + 4 = 12$$

Para J4:

$$p_{41} + p_{42} = 8 + 4 = 12$$

$$p_{42} + p_{43} = 4 + 3 = 7$$

$$p_{43} + p_{44} = 3 + 5 = 8$$

Para J5:

$$p_{51} + p_{52} = 5 + 6 = 11$$

$$p_{52} + p_{53} = 6 + 9 = 15$$

$$p_{53} + p_{54} = 9 + 7 = 16$$

Agora, para o cálculo do e_j será utilizada as restrições da Eq. (1), que se o tempo de processamento da primeira máquina for menor do que o da última

máquina ($p_{j1} < p_{jm}$), então é -1, e se o tempo de processamento da primeira máquina for maior ou igual à última máquina ($p_{j1} \geq p_{jm}$), então é 1.

Assim, de acordo com tempos de processamento da primeira máquina e da última máquina, foram obtidos os seguintes resultados do e_j .

- Para J1: $8 > 6 = 1$
- Para J2: $2 < 5 = -1$
- Para J3: $9 > 4 = 1$
- Para J4: $8 > 5 = 1$
- Para J5: $5 < 7 = -1$

Depois de calculado o e_j para cada tarefa, a Tabela 93 apresenta os resultados finais para a solução da heurística de Gupta calculados através da Eq. (1). Através dos resultados de A_j , as tarefas foram sequenciadas em ordem crescente, obtendo assim a seguinte sequência ótima: J2 - J5 - J3 - J1 - J4, que apresenta makespan de 46 minutos, como mostra o Gráfico de Gantt na Figura 156.

JOB	e_j	p_{jk}	$p_{j(k+1)}$	A_j	
J1	1	12	8	10	0,125
J2	-1	8	12	11	-0,125
J3	1	16	15	12	0,083333333
J4	1	12	7	8	0,142857143
J5	-1	11	15	16	-0,09090909

Tabela 93. Resultado da Heurística de Gupta

Fonte: Autores, 2017.



Figura 156. Gráfico de Gantt para a Heurística de Gupta

Fonte: Autores, 2017.

Para a resolução da segunda heurística, a CDS apresenta desde a Etapa 1 até a Etapa 3 que serão resolvidas a seguir.

Etapa 1: Primeira e última máquina, como mostra a Tabela 94.

JOB	pj1	pj4
J1	8	6
J2	2	5
J3	9	4
J4	8	5
J5	5	7

Tabela 94. Tempos de processamento (minutos) para a Etapa 1

Fonte: Autores, 2017.

Com os dados de tempos de processamento para estas duas máquinas fictícias apresentada na Tabela 94, foram aplicadas as regras do Algoritmo de Johnson e obteve-se a seguinte sequência: J2 – J5 – J1 – J4 – J3. Com esta sequência o valor do *makespan* para o problema original foi de 51 minutos, como mostra o Gráfico de Gantt na Figura 157.

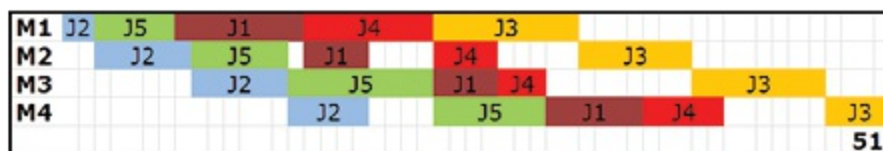


Figura 157. Gráfico de Gantt para a Etapa 1

Fonte: Autores, 2017.

Etapa 2: Soma dos tempos de processamentos da primeira e segunda máquina e última e penúltima máquina, como mostra a Tabela 95.

JOB	$p_{j1} + p_{j2}$	$p_{j4} + p_{j3}$
J1	12	10
J2	8	11
J3	16	12
J4	12	8
J5	11	16

Tabela 95. Tempos de processamento para a Etapa 2

Fonte: Autores, 2017.

Com os dados de tempos de processamento para estas duas máquinas fictícias apresentada na Tabela 95, foram aplicadas as regras do Algoritmo de Johnson e obteve-se a seguinte sequência: J2 – J5 – J3 – J1 – J4. Com essa sequência o valor do *makespan* para o problema original foi de 46 minutos, como mostra o Gráfico de Gantt na Figura 158.



Figura 158. Gráfico de Gantt para a Etapa 2

Fonte: Autores, 2017.

Etapa 3: Soma dos tempos de processamento da primeira, segunda e terceira máquina e da última, penúltima e antepenúltima, como mostra a Tabela 96.

JOB	$p_{j1} + p_{j2} + p_{j3}$	$p_{j4} + p_{j3} + p_{j2}$
J1	16	14
J2	14	17
J3	24	19
J4	15	12

J5	20	22

Tabela 96. Tempo de processamento para a Etapa 3

Fonte: Autores, 2017.

Com os dados de tempos de processamento para estas duas máquinas fictícias apresentada na Tabela 96, foram aplicadas as regras do Algoritmo de Johnson e obteve-se a seguinte sequência: J2 – J5 – J3 – J1 – J4. Com esta sequência o valor do *makespan* para o problema original foi de 46 minutos, como mostra o Gráfico de Gantt na Figura 158, pois as Etapas 2 e 3 apresentam a mesma sequência.

Portanto, a melhor sequência que apresenta o menor *makespan* para a heurística de CDS é: J2 – J5 – J3 – J1 – J4 com 46 minutos.

Com isto, comparando as sequências da heurística de Gupta e da CDS pode-se observar que as duas apresentam a mesma sequência, e conseqüentemente o mesmo *makespan* de 46 minutos.

Considerações finais

Como o objetivo desse trabalho foi realizar o sequenciamento da produção de tarugos em um processo de laminação, que minimiza o *makespan* em um ambiente *flow shop* permutacional considerando tempos de processamento, e para isso foi utilizando duas heurísticas, a de Gupta e a CDS. Com o estudo pode-se concluir que o objetivo foi alcançado e as duas heurísticas apresentaram resultados satisfatórios, pois o *makespan* inicial da produção foi de 54 minutos com uma sequência de: J1 – J2 – J3 – J4 – J5 e através da solução das heurísticas foi reduzido para 46 minutos a produção de 5 tarugos nas 4 máquinas com uma sequência de produção: J2 – J5 – J3 – J1 – J4.

No entanto, a resolução da heurística de Gupta apresentou maior complexidade em relação à de CDS, pois utiliza uma formulação complexa e pode ser de difícil implementação manual em tempo real. Sendo que

computacionalmente ambas demonstrariam resultados mais rápidos e fáceis para uma grande produção de tarugos. Assim, a utilização da heurística CDS é mais viável para esse tipo de problema descrito ao longo do trabalho.

É importante ressaltar que a necessidade de definir uma melhor sequência de produção dentro das empresas é de extremo interesse para se ter melhores resultados, e assim, poder aplicar seus recursos sem prejuízos financeiros e humanos.

Como pesquisa para trabalhos futuros, está sendo avaliada a proposta de um problema de programação da produção em sistemas *no-wait flow shop* com tempos de *setup* dependente da sequência em um laminador de uma indústria real.

Referências

- ALHARKAN, Ibrahim M. **Algorithms for sequencing and scheduling**. Riyadh: Industrial Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, 2011. Disponível em: <<http://bit.ly/2pg6Bt5>>. Acesso em: 4 out. 2017.
- BAKER, Kenneth R. **Introduction to sequencing and scheduling**. New York: John Wiley and Sons, 1974.
- CORREA, Jorge Hernán R. Aplicación de la heurística de gupta en la secuenciación de n tareas en m máquinas: un caso de estudio. **Scientia et technica**, Pereira, 16, n. 49, p. 69-71, 2011.
- _____. LOAIZA, María Elena B.; SARMIENTO, Germán Cock. Aplicación de la heurística de CDS en la secuenciación de n tareas en m máquinas: un caso de estudio. **Scientia et technica**, Pereira, v. 1, n. 52, p. 183-188, 2012.
- FERNANDES, Flavio Cesar F.; GOLDINHO FILHO, Moacir. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. São Paulo: Atlas, 2010.
- FUCHIGAMI, Hélio Yochihiro. **Introdução ao sequenciamento da produção**. Catalão: Ed. da UFG, 2016.
- NAGANO, Marcelo Seido; MESQUITA, Marco Stabilito. Métodos heurísticos para o problema de programação flow shop com tempos de setup separados. **Revista Produção Online**, v. 12, n. 2, p. 499-521, 2012.

PINEDO, Michael L. **Scheduling**: theory, algorithms and systems. 4. ed. Nova York: Springer, 2012.

RIZZO, Ernandes Marcos da S. **Processo de laminação dos aços**: uma introdução. São Paulo: ABM, 2007.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Johnston. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

Notas

- 111.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Bolsista CNPq. Contato: gis-sf@hotmail.com.
- 112.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: nayara.macedov@gmail.com.
- 113.** Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Orientador. Contato: zereis@ufg.br.

Obrigado por ler este livro que

publicamos!

Esperamos que esta obra tenha correspondido às suas expectativas.

Compartilhe por [e-mail](#) suas dúvidas e sugestões conosco.

Adquira outros títulos em www.livrosdapaco.com.br

Conheça o novo site da [Paco Editorial](#) com conteúdos exclusivos para professores!

Av. Dr. Carlos Salles Bloch, 658 - Sala 21
Anhangabaú - Jundiaí-SP - 13208-100