UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DECLARAÇÃO

GABRIEL CRISÓSTOMO DE ALMEIDA

TÍTULO DO TRABALHO

Monografia apresentada no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Aprovado em: 01/06/2021.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Sylvia Regina Mesquita de Almeida – EECA/UFG (Orientadora)

Prof. Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira – EECA/UFG

Eng. Danilo Borges Cavalcanti – PPG-GECON/UFG

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

Profa. Dra. Sylvia Regina Mesquita de Almeida (orientadora)

Em: 03/06/2021

Documento assinado eletronicamente por **Sylvia Regina Mesquita De Almeida**, **Professor do Magistério Superior**, em 11/06/2021, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **DANILO BORGES CAVALCANTI**, **Usuário Externo**, em 11/06/2021, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Janes Cleiton Alves De Oliveira**, **Professor do Magistério Superior**, em 11/06/2021, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2097074** e o código CRC **E7243F89**.

Referência: Processo nº 23070.026827/2021-58 SEI nº 2097074

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO AO PROJETO DO EDIFÍCIO KINGDOM PARK RESIDENCE

GABRIEL CRISÓSTOMO ALMEIDA

GOIÂNIA
2021

GABRIEL CRISÓSTOMO ALMEIDA

APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO AO PROJETO DO EDIFÍCIO KINGDOOM PARK RESIDENCE

Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás
Orientadora: Profª. Drª Sylvia Regina Mesquita de Almeida

GOIÂNIA
2021

AGRADECIMENTOS

À minha família, que está ao meu lado me dando suporte e intercedendo pelos meus objetivos: minha mãe, Virlene Almeida; meu pai, Hamilton Crisóstomo; e aos meus irmãos Hamilton Júnior, Charles José, Hoovert Willian e Carlos Eduardo Crisóstomo.

Aos professores da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA UFG) pelo conhecimento transmitido com clareza e qualidade e pelo auxilio neste período. Em especial agradeço à professora Sylvia, por toda atenção, zelo e cuidado comigo e com este trabalho.

Aos amigos que ganhei nessa jornada, que foram companheiros e motivadores na minha caminhada acadêmica, como Gabriel Gouveia, Giovanna Bueno e Josué Nazário de Lima.

À empresa Colmeia Consultoria e Projetos Ltda. pelo apoio técnico e por disponibilizar os projetos estruturais do edifício *Kingdom Park Residence*.

À empresa Unyt Arquitetura de Resultados por autorizar a utilização das plantas arquitetônicas do edifício *Kingdom Park Residence.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistemas de contraventamento mais comuns de acordo com a altura da edificação 22
Figura 1.2 – Preço da altura 24
Figura 2.1 – Solução em tabuleiro de xadrez 35
Figura 2.2 – Cargas em uma edificação devido ao vento 37
Figura 2.3 – Combinações de ações em otimização de topologia 38
Figura 2.4 – Soluções para combinações de ações em otimização de topologia 40
Figura 2.5 – Cargas simultâneas em uma edificação devido ao vento 41
Figura 2.6 – Discretização do domínio estendido 42
Figura 2.7 – Identificação dos elementos simétricos 42
Figura 2.8 – Distribuição das variáveis de projeto no domínio discretizados, impondo simetria no eixo *Y* 43
Figura 2.9 – Identificação dos elementos em posição correspondente para imposição de repetição de padrão ao longo do eixo *Y* 44
Figura 2.10 – Distribuição das variáveis de projeto no domínio discretizados, impondo repetição de padrão ao longo do eixo *Y* 45
Figura 2.11 – Elemento EPT-R4 50
Figura 2.12 – Representação do elemento TP2 no sistema local de coordenadas 53
Figura 3.1 – Modelo IV TQS 56
Figura 3.2 – Modelo VI TQS 56
Figura 3.3 – Vão teóricos em trechos rígidos 57
Figura 3.4 – Flexibilização da ligação viga-pilar 58
Figura 3.5 – Associação de “molas” na ligação viga-pilar 58
Figura 3.6 – Corte esquemático *Kingdom Park Residence* 60
Figura 3.7 – Estrutura de contraventamento ao longo da fachada sudeste 61
Figura 3.8 – Posição da estrutura de contraventamento em planta 61
Figura 3.9 – Posição da estrutura de contraventamento em planta 63
Figura 3.10 – Modelo 2 em “X”, com razão 0,75, em um pavimento 64
Figura 3.11 – Modelo 3 em “X”, centralizado em dois pavimentos 64
Figura 3.12 – Modelo 4 em “X”, centralizado em quatro pavimentos 65
Figura 3.13 – Modelo 5 em “X”, com razão 0,75, em quatro pavimento 67

Figura A1 – Direções da incidência do vento na edificação 75

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 –Parâmetros do concreto armado por pavimento 62
Quadro 3.2 –Parâmetros médios dos casos de carregamento da estrutura implementada pela Colmeia C.P. 64
Quadro 4.1 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 2 em “X”, com razão 0,75, em um pavimento..... 69
Quadro 4.2 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 3 em “X”, centralizado em dois pavimentos 69
Quadro 4.3 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 4 em “X”, centralizado em quatro pavimentos 70
Quadro 4.4 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 5 em “X”, com razão 0,75, em quatro pavimento 70
Quadro 4.5 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento de cada modelo de estrutura com o modelo implementado pelo escritório de projeto Colmeia C.P..... 70
Quadro 4.6 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento dos modelos 1, 3 e 4 71
Quadro 4.7 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento dos modelos 2 com 5 72
Quadro 4.8 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento dos modelos 2 com 1 e dos modelos 5 com 4..... 72
Quadro A1 – Casos de Carregamento Horizontal 76
Quadro A2 – Combinações de ELU de vigas, lajes, pilares e fundação 76
Quadro B1 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 1 82
Quadro B2 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 2 83
Quadro B3 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 3 84
Quadro B4 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 4 85

Quadro B5 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 5 86
Quadro B6 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- vigas e lajes 87
Quadro B7 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- vigas e lajes 91
Quadro B8 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- vigas e lajes 95
Quadro B9 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- vigas e lajes 99
Quadro B10 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- vigas e lajes 103
Quadro B11 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- pilares e fundações 107
Quadro B12 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- pilares e fundações 111
Quadro B13 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- pilares e fundações 115
Quadro B14 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- pilares e fundações 119
Quadro B15 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- pilares e fundações 123
Quadro B16 – Deslocamentos máximos – Modelo 1 127
Quadro B17 – Deslocamentos máximos – Modelo 2 127
Quadro B18 – Deslocamentos máximos – Modelo 2 128
Quadro B19 – Deslocamentos máximos – Modelo 3 128
Quadro B20 – Deslocamentos máximos – Modelo 4 129
Quadro B21 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 1 129
Quadro B22 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 2 130
Quadro B23 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 3 130
Quadro B24 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 4 131
Quadro B25 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 5 131

LISTA DE ABREVIATURAS

MEF	– Método dos Elementos Finitos
R4	– Retângulo de Quatro Nós
SIMP	– Solid Isotropic Material with Penalization
TP2	– Treliça Plana
DeslHc	– Deslocamentos máximos
DeslHp	– Deslocamentos máximos entre pisos

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

b – dimensão do padrão gradativo.

$\mathbf{B}_e$ – matriz de compatibilidade cinemática do elemento.

$c(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}))$ – flexibilidade média da estrutura.

e_i – elemento i.

e_j – elemento j.

E – módulo de elasticidade.

E_o – módulo de elasticidade do material sólido.

E_e – módulo de elasticidade do elemento e.

E_{min} – valor mínimo para o módulo de elasticidade.

$\hat{\mathbf{f}}_e$ – vetor forças nodais no elemento e no sistema local de coordenadas.

f_v – fração de volume.

$\mathbf{F}$ – vetor forças nodais da estrutura.

$\hat{\mathbf{F}}$ – vetor das forças equivalentes nodais da estrutura.

$\mathbf{F}_1$ – vetor de cargas nodais para a combinação de ações 1.

$\mathbf{F}_2$ – vetor de cargas nodais para a combinação de ações 2.

$\mathbf{F}^T\,\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})$ – trabalho das forças externas.

$\mathrm{FAV_t}$ – fator de amplificação dos esforços horizontais;

H – altura do edifício.

H_i – distância entre pavimentos.

H_j – fator de convolução.

$\mathbf{k}_e$ – matriz de rigidez do elemento e no sistema local de coordenadas.

$\mathbf{K}$ – matriz rigidez da estrutura.

$\mathbf{K}_o$ – matriz de rigidez do elemento para o material sólido, calculada com E_o.

$\mathbf{K}_e$ – matriz de rigidez do elemento e no sistema global de coordenadas.

$\mathbf{K}_{mín}$ – matriz de rigidez do elemento calculada com $E_{mín}$.

Le – comprimento de elemento e.

M – número do padrão.

$\Delta M_{tot,d}$ – Somatório dos produtos da força vertical pelos respectivos deslocamentos horizontais;

$\Delta M_{1tot,d}$ – Soma dos momentos de todas forças horizontais em relação a base da estrutura.

n_e – número de elementos.

$\mathbf{N}_e$ – matriz das funções de interpolação do elemento.

$N_i(x,y)$ – função interpolação associada ao nó *j*.

p – coeficiente de penalização.

r_{min} – raio do círculo que delimita a área de influência do filtro.

$\mathbf{R}_e$ – matriz de rotação do elemento *e*.

$\mathbf{u}$ – vetor dos deslocamentos em qualquer ponto da estrutura.

$u(x,y)$ – deslocamento na direção do eixo *x*.

$\mathbf{u}_e$ – vetor dos deslocamentos no interior do elemento.

$\hat{\mathbf{u}}_e$ – vetor dos deslocamentos nodais do elemento *e* no sistema local de coordenadas.

$\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})^T\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\,\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})$ – a energia interna de deformação da estrutura.

$\hat{\mathbf{U}}$ – vetor dos deslocamentos nodais da estrutura.

$\hat{\mathbf{U}}_e$ –vetor dos deslocamentos nodais do elemento *e* no sistema global de coordenadas.

$\mathbf{U}_1$ – vetor de deslocamentos nodais devido à combinação de ações 1.

$\mathbf{U}_2$ – vetor de deslocamentos nodais devido à combinação de ações 2.

$v(x,y)$ – deslocamento na direção do eixo *y*.

V_Ω – volume do domínio de projeto.

V_e – volume do elemento *e*.

V_{me} – volume de material no elemento *e*.

V_p – volume total de material prescrito.

x_k – variável de projeto *k* atribuída aos elementos simétricos *i* e *j*.

X_i – coordenada *x* do baricentro do elemento *i*.

X_j – coordenada *x* do baricentro do elemento *j*.

X_s – coordenada *x* do eixo de simetria.

Y_i – coordenada *y* do baricentro do elemento *i*.

Y_j – coordenada *y* do baricentro do elemento *j*.

Símbolos Gregos

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – vetor das deformações.

ε_x – deformação normal na direção do eixo *x*.

ε_y – deformação normal na direção do eixo *y*.

$\partial\rho_{ei}$ – derivada parcial em relação ao elemento e_i.

$\partial\rho_{ei}$ – derivada parcial em relação ao elemento e_j.

∂x_k – derivada parcial em relação a variável de projeto x_k.

γz – parâmetro de estabilidade gama Z

$\boldsymbol{\rho}$ – vetor que contém as densidades dos elementos.

ρ_{ei}, ρ_{ej} – densidades dos elementos *i* e *j*.

$\boldsymbol{\sigma}$ – vetor das tensões.

σ_x – tensão normal na direção do eixo *x*.

σ_y – tensão normal na direção do eixo *y*.

τ_{xy} – tensão cisalhante do plano *x*-*y*.

ν – coeficiente de Poisson.

γ_{xy} – deformação angular no plano *x*-*y*.

Ω_{Pk} – subconjunto *k* formado pelos elementos em posições correspondentes no padrão.

Ω_{Sk} – subconjunto *k* formado por um par de elementos simétricos.

Símbolos Matemáticos

∇ – operador diferencial.

$\boldsymbol{\Sigma}$ – somatório.

RESUMO

Dos muitos desafios que uma edificação alta trás pode-se destacar a complexidade do projeto estrutura, devido principalmente as cargas mais elevadas e a estabilidade da edificação. O objeto deste trabalho é o desenvolvimento e analise estrutural de estruturas de contraventamento, a luz de estudos de otimizações topológica, em uma construção alta em Goiânia. Foi implementado 4 modelos de contraventamento e, além do já existente no projeto, foi analisado parâmetros de estabilidade e deslocamento entre pisos. Como resultado, as estruturas mostram-se eficientes principalmente nos deslocamentos entre pavimentos, mantendo os valores de estabilidade conforme a estrutura do projeto original.

Palavras-chave: Edifícios altos. Otimização topológica. Estruturas de contraventamento. Deslocamentos. Parâmetros de estabilidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 21
   1.1. OBJETIVOS 26
   1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 29
   2.1. DEFINIÇÕES INICIAIS 29
   2.2. MODELO SIMP 31
   2.3. O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 32
   2.4. FILTRO DE SENSIBILIDADE 35
   2.5. CONSIDERAÇÕES DA CARGA ORIUNDA DO VENTO 36
   2.6. IMPOSIÇÃO DE SIMETRIA E REPETIÇÃO DE PADRÃO 40
   2.7. ANÁLISE ESTRUTURAL VIA MEF 46
      2.7.1. Aplicação ao elemento EPT-R4 49
      2.7.2. Aplicação ao elemento TP2 51
3. ANÁLISE ESTRUTURAL PELO SOFTWARE TQS 55
   3.1. ANÁLISE ESTRUTURAL TQS 55
   3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO *KINGOM PARK RESIDENCE* 59
   3.3. ESTRUTURAS MODELADAS E ANALISADAS 62
4. RESULTADOS 69
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 71

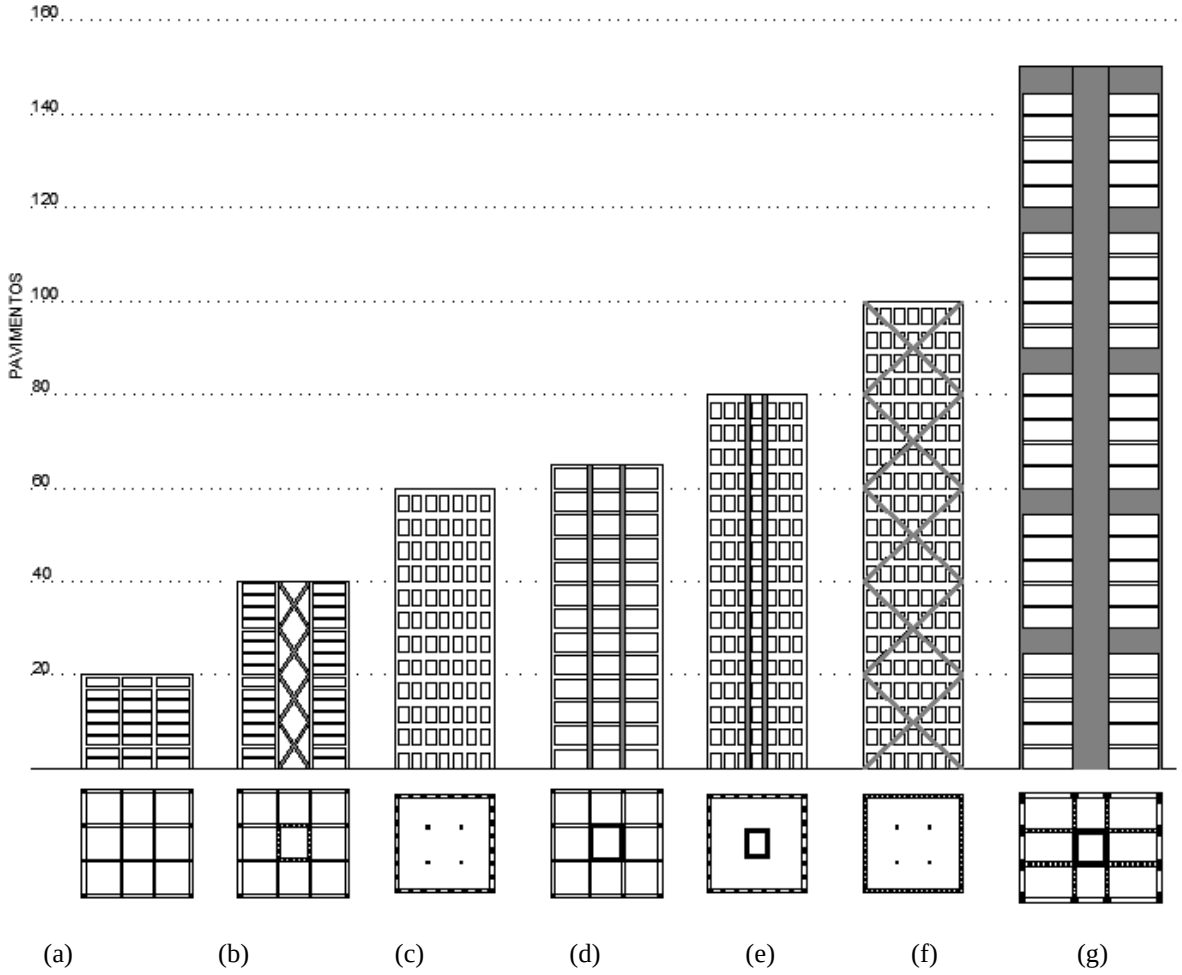
CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX observa-se o aumento na altura dos edifícios e no número de edificações altas no cenário mundial e, mais recentemente, no cenário nacional. Essa tendência teve início na América do Norte, mas hoje os países asiáticos são o grande destaque nesse tipo de construção. Muitas dessas soluções arquitetônicas possuem função comercial, embora na última década tenha havido também grande aumento do uso residencial dessas edificações. Esse tipo de construção enfrenta muitas complexidades em vários setores, como arquitetônico, tecnológico, licenciamento público *etc*. Dentre as maiores complexidades destaca-se o projeto estrutural. Cargas mais elevadas, seja devido ao maior peso da construção ou ao vento, e a estabilidade da edificação são cenários que devem ser melhor analisados.

O conhecimento que possibilitou chegar às tecnologias construtivas usadas nessas grandes edificações evoluiu juntamente com o aumento das construções. Ali e Moon (2007) apresentam um interessante histórico sobre a evolução das edificações segundo sua altura e suas correspondentes soluções estruturais. Embora já se tenham passado 14 anos desse estudo, algumas conclusões gerais ainda são pertinentes. No final do século XIX, quando Nova Iorque já possuía edificações de 30 andares, as construções possuíam estrutura compostas por núcleos de aço, com vazios em seu interior, e materiais de revestimentos mais leves, como pele de vidro, afim de diminuir o peso próprio da edificação. Após as guerras vividas do século XX, novos estilos arquitetônicos foram agregados aos projetos da construção civil e ferramentas computacionais possibilitaram realizar analises estruturais mais complexas. Com essas considerações, muitas metodologias de projeto e construção foram desenvolvidas com a finalidade garantir a estabilidade desse tipo de construção. Ali e Moon (2007) indicam que, em edifícios com até 30 andares, é possível alcançar a estabilidade somente pelo do enrijecimento dos pilares. Porém em edifícios, altos, Ali e Moon (2007) ressaltam a necessidade de se projetar sistemas estruturais específicos para o contraventamento. A Figura 1.1 apresenta um resumo adaptado dos sistemas apresentados por Ali e Moon (2007). É importante observar que tais análises referem-se a regiões do globo terrestre em que o vento tem uma velocidade básica maior que a do Brasil, que tem a maior parte de seu território em região de ventos moderados. O menor valor da velocidade básica do vento pode resultar na aplicabilidade de um sistema

estrutural a edifícios com maior número de andares, mas, em linhas gerais, a análise permanece válida em termos gerais.

Figura 1.1 – Sistemas de contraventamento mais comuns de acordo com a altura da edificação: (a) Pórtico rígido; (b) Pórtico com treliça de cisalhamento; (c) Tubo externo aporticado; (d) Pórtico com núcleo rígido interno; (e) Estrutura aporticada interna e externa; (f) Tubo externo treliçado com colunas internas; (g) Pórtico com estabilizadores horizontais.
FONTE: ALI; MOON (2007) e TORRES (2014) (adaptado pelo autor)



Na Figura 1.1(a) observa-se que o modelo estrutural em pórtico rígido é indicado para construções em torno de 20 pavimentos. O sistema de pórticos possibilita maior flexibilidade no planejamento dos pisos com formas facilmente moldadas, porém são peças caras. Os autores recomendaram o sistema treliçado apresentado na Figura 1.1(b) para edificações em torno de 40 pavimentos. Esse modelo resiste às cargas laterais por meio das treliças de cisalhamento; no entanto ocupa considerável espaço físico. Esses dois primeiros tipos são os mais empregados no Brasil.

O sistema tubular externo apresentado na Figura 1.1(c) é composto por pórtico rígido no limite da construção e é indicado para construções em torno de 60 pavimentos. Já o sistema estrutural

de pórticos e núcleo rígido interno, apresentado na Figura 1.1(d), e estrutura tubular interno e externo, apresentado na Figura 1.1(e), foram indicados para edificações em torno de 70 pavimentos e 80 pavimentos, respectivamente. Ambos os sistemas resistem as cargas devido às paredes integradas aos sistemas de quadros que também ocupam grande espaço físico. O sistema com núcleo interno possui uma estrutura nuclear interna integrada a uma estrutura externa. Esse modelo possui limitações arquitetônicas devido a existência de uma grande estrutura no interior.

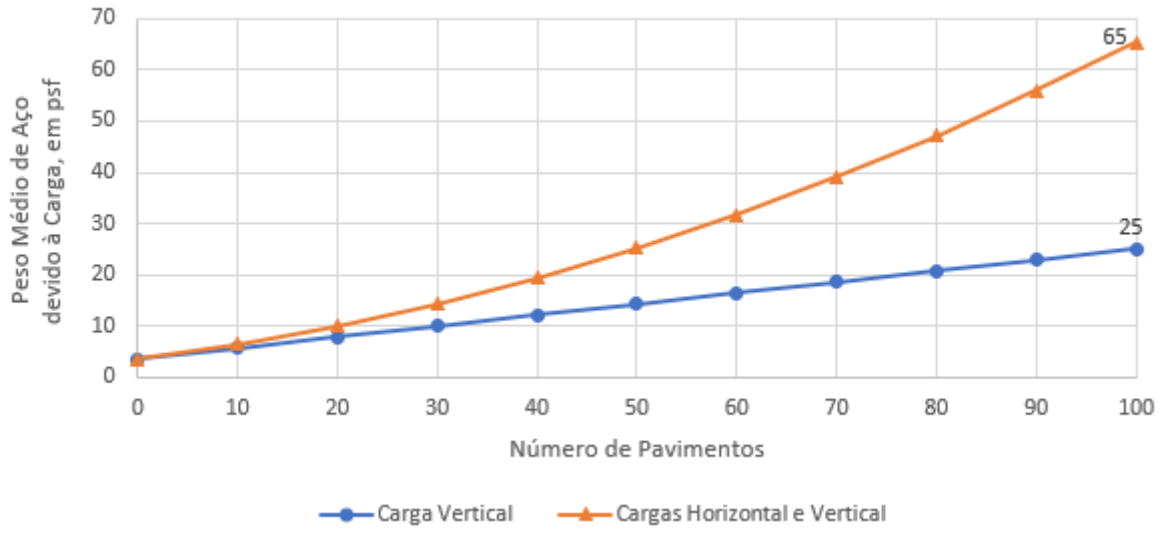
O sistema de pórtico treliçado externo em concreto apresentado na Figura 1.1(f) é associado para construções em torno de 100 andares. Esse modelo de estrutura possui maior espaçamento de pilares em comparação aos sistemas tubulares, porém os elementos estruturais dificultam a visualização externa. Já o sistema com estabilizadores horizontais (*outrigger*), representado na Figura 1.1(g), é a combinação de paredes e treliças, com cintas estabilizadoras integradas aos pórticos. Esse modelo de sistema estrutural Ali e Moon (2007) registrou a eficácia para prédio em torno de 150 pavimentos. Porém essa estrutura garante a estabilidade da construção, mas não agrega na resistência ao cisalhamento da edificação.

Khan (1969)[1], *apud* Ali e Moon (2007), percebeu que, à medida que aumenta a altura do edifício, há uma mudança na influência das cargas horizontais e verticais no consumo de material estrutural. A carga vertical é a combinação do peso da edificação, da estrutura e dos elementos construtivos fixos, com o peso decorrente de seus equipamentos de utilização e a estimativa de carga decorrente do uso proposto. Já a carga horizontal é proveniente, principalmente, da ação do vento na estrutura. Embora o crescimento do consumo de aço quando se considera apenas a carga vertical seja proporcional ao crescimento da altura da edificação, quando a carga total é levada em consideração em projeto, o crescimento do consumo de aço é não linear. Essa relação é mostrada na Figura 1.2 para edifícios em estrutura metálica e Khan nomeou essa diferença de preço pela altura. Caso se refizesse o estudo de Khan para estruturas em concreto armado, o resultado deve ser semelhante, visto que o comportamento mecânico das ações não se altera. Como resultado, à medida que há o aumento da altura da edificação há uma maior intensidade de esforços não só nos pilares, mas também nas vigas. Dessa forma Ali e Moon (2007) registraram uma hierarquia de sistemas estruturais, conforme apresentado na Figura 1.1. Esses sistemas estruturais levam em consideração o

[1]KHAN, F.R. Recent structural systems in steel for high-rise buildings. In Proceedings of the British Constructional Steelwork Association Conference on Steel in Architecture. London: British Constructional Steelwork Association.1969

conceito de preço pela altura e mostram uma mudança na topologia dos sistemas de acordo com o número de pavimentos e a necessidade de transpor a carga da edificação para a fundação.

Figura 1.2 – Preço da altura.
FONTE: ALI; MOON, 2007 (adaptado pelo autor)



Com a finalidade de desenvolver uma estrutura mais adequada para as edificações é possível utilizar conceitos de otimização, que é a área da ciência que utiliza métodos matemáticos para busca das melhores soluções para diversos problemas. Bendsøe e Sigmund (2003) dividem o campo da otimização estrutural em três grupos, conforme a etapa de projeto em que se aplica: otimização paramétrica; otimização de forma; e otimização topológica. A **otimização paramétrica** parte do sistema estrutural já determinado e procura melhores respostas para alguns parâmetros da estrutura como as dimensões dos elementos. É, portanto, aplicado nas fases mais avançadas do projeto da estrutura, quando já se tem definidas a disposição e as ligações dos elementos estruturais. Já a **otimização de forma** busca os melhores contornos do elemento estrutural, sendo aplicado para melhorar localmente o domínio estrutural. Já **otimização topológica** busca a melhor distribuição de material em um espaço limitado pelas condições de projeto, sendo aplicada na fase inicial de projeto, onde se dá a concepção estrutural.

Para que o processo de otimização se desenvolva, é necessário estabelecer um critério de avaliação da qualidade das respostas do sistema, denominado **função objetivo**. Esse critério deve ser descrito em função de grandezas que variam de forma independente durante o processo de otimização, denominadas **variáveis de projeto,** e resulta em um número que deve expressar a qualidade de cada solução encontrada. O custo da estrutura, seu peso e o volume de materiais são comumente utilizados como função objetivo nas aplicações de otimização de dimensões.

Medidas de flexibilidade e deslocamentos são comumente utilizadas nas aplicações de otimização topológica. As **restrições** do problema de otimização são geralmente limitações de projeto, quer sejam elas construtivas, quer sejam relativas ao comportamento mecânico.

No campo da otimização estrutural é possível utilizar uma grande gama de métodos para a análise, sendo atualmente mais utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse tipo de aplicação a região do espaço onde a estrutura pode ser definida, denominada **domínio estendido**, é discretizada em elemento finitos e, na maioria das vezes, associa-se a quantidade de material em cada elemento às variáveis de projeto.

Soluções topológicas podem ser obtidas utilizando metodologias clássicas da otimização topológica como os **métodos de densidade**, quando utilizando metodologias gestadas na área da otimização de dimensões como o **método da estrutura base**. Há ainda outras abordagens aplicadas principalmente a sistemas mecânicos, porém de menor interesse para aplicação a sistemas de contraventamento de edifícios. Sigmund e Maute (2013), em sua revisão sobre o estado da arte da área de otimização de topologia, a definem como a área da ciência que busca responder à pergunta fundamental da engenharia sobre como distribuir material dentro de um domínio prescrito, de forma a obter o melhor desempenho estrutural. Deaton e Grandhi (2014) em outra revisão do estado da arte dessa área, define otimização de topologia como o processo de determinação de conectividade, forma e localização de vazios dentro de um domínio de projeto. No campo dos métodos de densidade, citam-se o trabalho seminal de Bendsøe e Kikuchi (1988), passando pela inestimável contribuição de Bendsøe (1989) e Zhou, Rozvany (1991) com o modelo SIMP (*Solid Isotropic Material withPenelazation*), o trabalho de Sigmund e Petersson (1998) com a identificação das causas das instabilidades numéricas características desse tipo de abordagem, e o trabalho de Sigmund (2001) com a disponibilização de um código computacional simples que muito contribuiu para a divulgação do método. No campo da aplicação a edifícios citam-se os trabalhos de Stromberg *et al*. (2011, 2012) e de Beghini *et al*. (2015) e, na UFG, o trabalho de Torres (2014). Como um avanço recente que pode ser futuramente incorporado às aplicações para edifícios, citam-se os trabalhos de Zhang, Paulino e Ramos Jr (2018), que desenvolveu um procedimento para o emprego de múltiplos materiais no processo de otimização de topologia, e de Sanders *et al*. (2018), que apresenta um código computacional educacional para tal.

Uma abordagem distinta e relevante para o caso estudado neste trabalho é o **método da estrutura base**, que parte de uma estrutura reticulada pré-definida com um grande número de

barras para obtenção de soluções topológicas pela eliminação das barras situadas em posição que contribuam pouco para a eficiência da solução. Esse tipo de abordagem é oriunda da otimização de dimensões e suas soluções estão condicionadas à estrutura inicial. Zegard e Paulino (2014) definem esse tipo de abordagem como a conformação da estrutura em elementos de treliça com a eliminação de barras não necessárias e ressaltam que as soluções são mais exequíveis e práticas, porém não há como se determinar se a malha e a solução é realmente a solução ótima problema devido à dependência da solução em relação à estrutura base inicial. Nesse campo, o trabalho de Ramos Jr e Paulino (2016) constitui um marco na formulação elástica do método da estrutura base empregando um filtro durante o processo de otimização que permite a extração de topologias em equilíbrio já durante o processo de otimização. Os autores consideram que essa proposta faz a transição efetiva do método do campo da otimização de dimensões para o campo de otimização de topologia. Esse trabalho foi aperfeiçoado por Sanders, Ramos Jr e Paulino (2017) que propuseram uma adaptação para obtenção automática do parâmetro de filtragem de barras finas e por Zhang, Paulino e Ramos Jr (2018) que estenderam o método para problemas com múltiplos materiais.

Devido à dificuldade de representar todas as condições de projeto na formulação do problema de otimização topológica, o processo pode gerar modelos que não são exequíveis na prática. Torres (2014) estudou a consideração de diversas combinações de carregamento e a aplicação das técnicas de imposição de simetria e repetição de padrão propostas por Almeida, Paulino e Silva (2010) ao projeto de edifícios utilizando o método da densidade. Este trabalho propõe a aplicação de conceitos de otimização de topologia apresentados no trabalho de Stromberg *et al*. (2012) e a verificação do efeito dessas soluções em um estudo de caso real: o edifício *Kingdom Residence Park*.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo verificar como se comportam os leiautes obtidos com a aplicação de conceitos do método de densidade em otimização de topologia a um caso real de um edifício residencial alto em Goiânia (GO), o edifício *Kingdom Residence Park*, e comparar o efeito dessas soluções de arranjo estrutural no comportamento global do edifício. Deseja-se especialmente verificar a influência desses leiautes nos índices de estabilidade global do edifício.

Objetivo geral:

Estudar variações nos leiautes na estrutura de contraventamento do edifício residencial *Kingdom Residense Park* inspiradas em estudos anteriores de otimização de topologia e analisar seu efeito nos índices de estabilidade do edifício.

Objetivos específicos:

- Aplicar as conclusões do trabalho de Stromberg *et al*. (2012) para gerar variações do leiaute do sistema de contraventamento do edifício em estudo.
- Analise dos parâmetros de estabilidade como o γ_z (GamaZ) e a deslocabilidade total do edifício e o deslocamento relativo entre pavimentos para as soluções propostas.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto deste estudo é dividido em quatro capítulos, sendo o restante do texto disposto como segue. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica sobre métodos de densidade em otimização de topologia a fim de permitir ao leitor a introdução aos conceitos envolvidos na técnica. São descritos os conceitos básicos do método, a formulação matemática do problema e o modelo SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*). Também são apresentadas as considerações relativas à carga de vento e à imposição de simetria e de repetição de padrão. O capítulo traz ainda os elementos finitos a serem utilizados na análise estrutural. O Capítulo 3 descreve a análise estrutural realizada pelo software TQS e as considerações de projeto do edifício *Kindoom Residence Park*. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos da análise estrutural do edifício como as modificações no sistema de contraventamento. Finalizando o documento, o Capítulo 5 expõem as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos necessários para aplicação do método de densidade ao problema de minimização da flexibilidade média da estrutura. Para familiarização do leitor com o método, sugere-se o código educacional desenvolvido por Sigmund (2001).

2.1. DEFINIÇÕES INICIAIS

Na maioria das aplicações do método da densidade em otimização topológica, a análise estrutural é usualmente realizada pelo Método dos Elementos Finitos. Nesse cenário considera-se que o material existente em cada elemento é uma fração do volume do elemento. Assim considera-se como variável de projeto uma pseudodensidade ou uma densidade relativa de cada elemento (ρ_e), definida na equação (2.1). Por simplicidade, a maioria das publicações na área utiliza apenas o termo densidade, terminologia adotada neste trabalho.

$$\rho_e = \frac{V_{me}}{V_e} \tag{2.1}$$

Sendo:

ρ_e – a densidade do elemento e;

V_{me} – o volume de material no elemento e;

V_e – o volume do elemento e.

Dessa forma o valor da densidade do material varia entre 0 (zero), representando a ausência de material, e 1 (a unidade), que corresponde ao elemento completamente preenchido de material.

O volume de material prescrito (V_p) pelo projetista pode ser definido como uma fração (f_v) do volume total do domínio de projeto, conforme apresentado na equação (2.2).

$$V_p = f_v \, V_\Omega \tag{2.2}$$

Sendo:

V_p – o volume total de material prescrito;

f_v – a fração de volume;

V_Ω – o volume do domínio de projeto.

O volume do domínio de projeto é dado pelo somatório dos volumes dos elementos, conforme a equação (2.3). Se todos os elementos tiverem o mesmo volume, o volume total do domínio de projeto se reduz ao produto da quantidade de elementos (n_e) pelo volume do elemento (V_e), conforme a equação (2.4).

$$V_\Omega = \Sigma V_e \tag{2.3}$$

$$V_\Omega = V_e\, n_e \tag{2.4}$$

Sendo:

n_e – o número de elementos.

A maioria dos problemas de otimização de topologia requer a manutenção do volume de material constante durante o processo de otimização, como mostra a equação (2.5). Assim, substituindo as equações (2.1), (2.2) e (2.4) em (2.5), obtém-se a restrição de volume, *RV*, apresentada na equação (2.6).

$$\Sigma V_{me} - V_p = 0 \tag{2.5}$$

$$RV = \Sigma \rho_e - f_v n_e = 0 \tag{2.6}$$

O sistema de equações de equilíbrio da estrutura é representado na equação (2.7). Essa é uma das condições de projeto que devem ser atendidas em todas as soluções durante o processo de otimização. No entanto, geralmente esse conjunto equações não é tratado como um conjunto de restrições de igualdade a ser atendido pelo otimizador, mas como um sistema de equações a ser resolvido a parte do processo de otimização, formando uma formulação aninhada do problema.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.7}$$

Sendo:

F – o vetor forças nodais da estrutura;

K – a matriz rigidez da estrutura;

U – o vetor de deslocamentos nodais da estrutura;

ρ – o vetor que contém as densidades dos elementos.

No problema estudado neste trabalho, a função objetivo é uma medida que reflete a flexibilidade média da estrutura, no caso a energia interna de deformação ou o trabalho das forças externas, como mostrado na equação (2.8).

$$c\big(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})\big) = \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})^{\mathbf{T}}\ \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\ \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{F}^{\mathbf{T}}\ \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.8}$$

Sendo:

$c(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}))$ – a flexibilidade média da estrutura;

$\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})^{T}\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\ \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})$ – a energia proporcional a energia interna de deformação da estrutura;

$\mathbf{F}^{T}\ \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})$ – o trabalho das forças externas.

A matriz de rigidez da estrutura é formada pelas contribuições de cada elemento *e* que a compõem, conforme mostra equação (2.9).

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) = \Sigma \mathbf{K}_e(\rho_e) \tag{2.9}$$

Sendo:

$\mathbf{K}_e$ – a matriz rigidez do elemento *e*;

ρ_e – a densidade do elemento *e*.

2.2. MODELO SIMP

A propriedade do material utilizada na análise de estruturas relacionada à sua rigidez é o módulo de elasticidade. Assim, é necessário relacionar a densidade do elemento ρ_e ao módulo de elasticidade do material E_o. A abordagem do problema de otimização é feita com um relaxamento das variáveis de projeto, permitindo-se que as densidades assumam quaisquer valores reais entre os limites físicos vazio ($\rho_e = 0$) e material sólido ($\rho_e = 1$). Assim, o modelo que relaciona a densidade com o módulo de elasticidade deve ser constituído de tal forma a induzir que não hajam valores intermediários na solução final do processo.

Na maioria das aplicações do método da densidade, utiliza-se o modelo SIMP, acrônimo de *Solid Isotropic Material with Penalization*, proposto separadamente e de forma independente

por Bendsøe (1989) e por Zhou e Rozvany (1991). Esse modelo é representado, em sua forma original, pela equação (2.10).

$$E_e = E(\rho_e, E_o) = \rho_e{}^p E_o \tag{2.10}$$

Sendo:

E_e – módulo de elasticidade do elemento *e*;

p – coeficiente de penalização;

E_o – módulo de elasticidade do material sólido.

O modelo SIMP torna as densidades intermediárias desinteressantes para o algoritmo de otimização quando são utilizados coeficiente de penalização superior à unidade, uma vez que o acréscimo de densidade não gera significativo aumento na rigidez do elemento. A penalização das densidades intermediárias induz a uma solução final em que predominam o vazio ou o material sólido, obtido pelo completo preenchimento do elemento. O valor de *p* mais comumente adotado é 3 (três). O modelo apresentado em (2.10) pode conduzir a elementos nulos na diagonal da matriz de rigidez da estrutura, o que causa problemas na solução do sistema de equações apresentado em (2.7). Assim, quando o modelo SIMP é utilizado na forma da equação (2.10), adota-se um valor pequeno ρ_{min} como limite inferior para a densidade ρ_e, permanecendo o limite superior igual à unidade.

Sigmund (2007) propôs uma modificação no modelo de SIMP, conforme apresentado na equação (2.11). Com essa alteração, é possível permitir que a densidade assuma valor nulo, pois garante um valor mínimo para a rigidez do elemento.

$$E_e = E(\rho_e, E_o) = E_{mín} + \rho_e{}^p (E_o - E_{mín}) \tag{2.11}$$

Sendo:

E_{min} – valor mínimo para o módulo de elasticidade.

2.3. O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Assim, o problema de otimização da flexibilidade média da estrutura em sua forma aninhada é expresso na equação (2.12).

$$
\begin{array}{ll}
Obter & \boldsymbol{\rho} \\
Que\ minimiza & c\big(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})\big) = \mathbf{F}^T\,\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \\
Tal\ que & \Sigma\rho_e - f_v n_e = 0 \\
 & \rho_{\boldsymbol{mín}} \leq \rho_e \leq 1 \qquad e = 1 \ldots n_e \\
Com & \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{F} \\
 & E_e = E(\rho_e, E_o)
\end{array}
\tag{2.12}
$$

Caso seja utilizado o modelo SIMP original, expresso na equação (2.10), utiliza-se um valor pequeno para ρ_{min}, usualmente 0,001. Caso seja utilizado o modelo SIMP modificado, expresso na equação (2.11), faz-se $\rho_{min} = 0$.

Os métodos de otimização baseados na teoria de mínimos de funções demandam a obtenção dos gradientes da função objetivo e das restrições em relação às variáveis de projeto, dados pelas derivadas parciais dessas funções em relação a cada uma das variáveis de projeto. A sensibilidade da flexibilidade média pode ser obtida empregando-se o método analítico direto, aqui descrito como em Christensen e Klarbring (2009). Assim, a sensibilidade da função objetivo, apresentada na equação (2.8), em relação à *j*-ésima variável de projeto é apresentada na equação (2.13). Como, no problema em questão, as forças não dependem das densidades, pode-se reescrever a equação (2.13) na forma (2.14).

$$\frac{\partial\, c}{\partial\, \rho_j} = \frac{\partial\, \mathbf{F}^T}{\partial\, \rho_j}\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) + \frac{\partial\, \mathbf{U}}{\partial\, \rho_j}\mathbf{F}^T \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial\, c}{\partial\, \rho_j} = \frac{\partial\, \mathbf{U}}{\partial\, \rho_j}\mathbf{F}^T \tag{2.14}$$

A derivada parcial da equação de equilíbrio apresentada na equação (2.7) é apresentada na equação (2.15). Como a matriz **K** é positiva definida e as forças não dependem das densidades, pode-se reescrever a equação (2.15) na forma (2.16).

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial\, \rho_j} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial\, \rho_j}\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial\, \rho_j}\,\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial\, \rho_j} = -\,\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})^{-1}\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial\, \rho_j}\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.16}$$

Substituindo-se a equação (2.16) na equação (2.14), obtém-se a equação (2.17). A equação (2.7) pode ser escrita na forma (2.18). Assim, substituindo-se (2.18) em (2.14), obtém-se a sensibilidade da flexibilidade média na forma apresentada na equação (2.19).

3,

$$\frac{\partial\, c}{\partial\, \rho_j} = \mathbf{F}^T\, \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})^{-1}\, \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial\, \rho_j}\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.17}$$

$$\mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})^{-1}\, \mathbf{F} \tag{2.18}$$

$$\frac{\partial\, c}{\partial\, \rho_j} = -\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})^T\, \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial\, \rho_j}\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.19}$$

Nos casos em que se aplica o modelo SIMP original, apresentado na equação (2.10), a equação (2.19) fica desenvolvida na forma (2.20). No caso em que se aplica o modelo SIMP modificado, apresentado na equação (2.11), a equação (2.19) fica desenvolvida na forma (2.21).

$$\frac{\partial\, c}{\partial\, \rho_j} = -\, p\, \rho_j{}^{p-1}\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})^T\, \mathbf{K}_{\mathrm{o}}\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.20}$$

$$\frac{\partial\, c}{\partial\, \rho_j} = -\, p\, \rho_j{}^{p-1}\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})^T\, (\mathbf{K}_{\mathrm{o}} - \mathbf{K}_{mín})\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.21}$$

Sendo:

$\mathbf{K}_{\mathrm{o}}$ – a matriz de rigidez do elemento para o material sólido, calculada com E_o;

$\mathbf{K}_{mín}$ – a matriz de rigidez do elemento calculada com $E_{mín}$.

Também é necessário determinar a sensibilidade das restrições, tanto a de volume quanto as laterais. Assim, considerando a restrição de volume expressa em (2.6), sua derivada em relação à *j*-ésima variável de projeto é expressa na equação (2.22).

$$\frac{\partial RV}{\partial\, \rho_j} = 1 \tag{2.22}$$

As restrições laterais são apresentadas agrupadas no problema (2.12) e representam um conjunto de inequações. Assim, as inequações (2.23) e (2.24) representam a restrições laterais associadas ao elemento *e*.

$$RLI_e = \rho_{mín} - \rho_e \leq 0 \tag{2.23}$$

$$RLS_e = \rho_e - 1 \leq 0 \tag{2.24}$$

Assim, a sensibilidade da restrição da lateral inferior, RLI_e, apresentada na equação (2.23), é dada pelas equações (2.25) e a sensibilidade da restrição da lateral superior, RLS_e, apresentada na equação (2.24), é dada pelas equações (2.26).

$$\frac{\partial\, RLI_e}{\partial\, \rho_j} = \begin{cases} -1 & para \quad e = j \\ 0 & para \quad e \neq j \end{cases} \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial\, RLS_e}{\partial\, \rho_j} = \begin{cases} 1 & para \quad e = j \\ 0 & para \quad e \neq j \end{cases} \tag{2.26}$$

2.4. FILTRO DE SENSIBILIDADE

A abordagem do problema de otimização de topologia pelo método da densidade é propensa a instabilidades numéricas como as soluções em tabuleiro de xadrez, onde se observa a alternância entre elementos sólidos e vazios, como ilustrado na Figura 2.1. Em inglês utiliza-se o termo *checkerboard*, tabuleiro de damas.

Figura 2.1 – Solução em tabuleiro de xadrez.
FONTE: SIGMUND, 2001 (adaptado pelo autor)

O filtro de sensibilidade (SIGMUND, 2001) é um processo heurístico que altera as sensibilidades analíticas da função objetivo, conforme a equação (2.27).

$$\frac{\widehat{\partial c}}{\partial\, \rho_i} = \frac{\sum H_j\, \rho_j\, \frac{\partial c}{\partial \rho_j}}{\rho_i\, \sum H_j} \tag{2.27}$$

Sendo:

ρ_i – densidade do elemento *e*;

ρ_j – densidade do elemento *j*;

H_j – fator de convolução definido em (2.28).

O operador de convolução pode ser descrito como a diferença entre o raio de um círculo centrado no elemento *i* e com raio r_{min} e a distância da distância entre o baricentro dos elementos *j* no interior do círculo e o baricentro do elemento *i*.

$$H_j = r_{mín} - dist(i,j) \tag{2.28}$$

com,

$$\{j \in N \mid dist(i,j) \leq r_{mín}\}, \ i = 1, \dots, n_e \tag{2.29}$$

Sendo:

r_{min} – raio do círculo que delimita a área de influência do filtro.

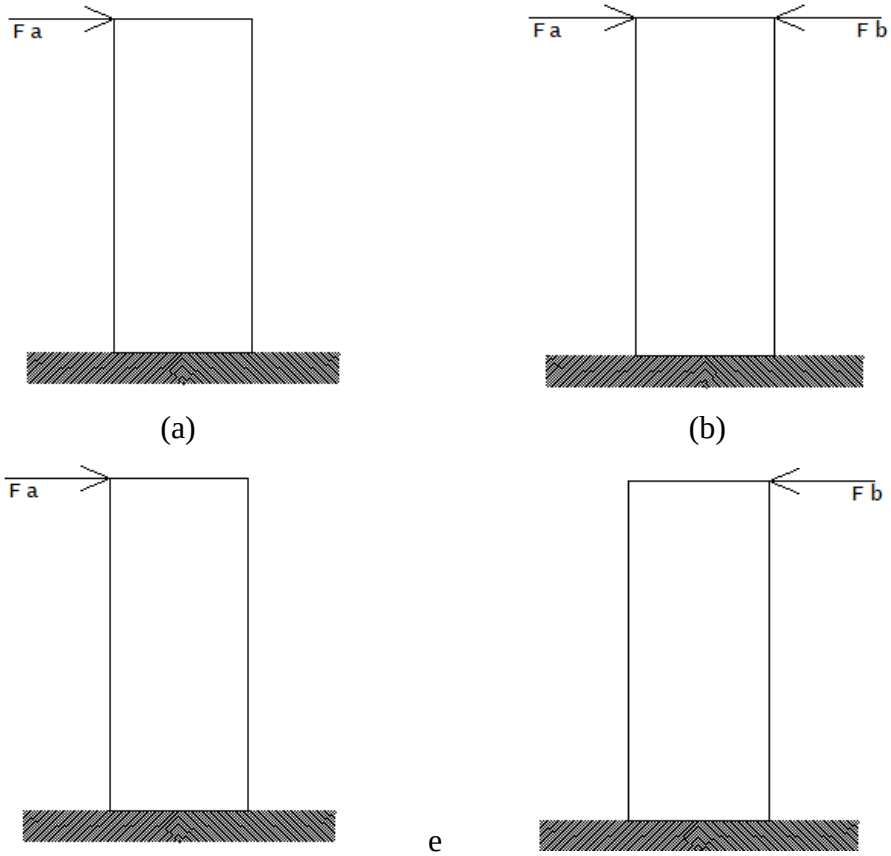
2.5. CONSIDERAÇÃO DA CARGA ORIUNDA DO VENTO

A carga de vento é levada em consideração no projeto de estruturas considerando várias combinações de carregamento, dependendo da direção e do sentido do vento. Em cada combinação o vento gera cargas de compressões na fachada onde incide e sucções nas demais fachadas, com mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Cargas em uma edificação devido ao vento
Fonte: autor

Os valores das cargas devidas ao vento são influenciados pela topografia do terreno, pela urbanização no entorno da obra, pela localização geográfica e pela geometria da edificação. A consideração adequada das ações de projeto oriundas de combinações distintas deve ser adequadamente tratada nas aplicações de otimização de topologia considerando as ações de vento. A Figura 2.3 ilustra combinações de ações considerando cargas horizontais atuando no topo da estrutura. A Figura 2.3(a) apresenta uma única carga aplicada (F_A), formando uma única configuração de ações (1). A Figura 2.3(b) representa as duas cargas (F_A e F_B) aplicadas simultaneamente, formando uma única configuração de carga (1). Nesse caso, há um único sistema de equações de equilíbrio expresso na equação (2.7), com ambas as cargas integrando o vetor de forças **F**. Na Figura 2.3(c) cada carga integra uma combinação de ações distinta (F_A integra a combinação 1 e F_B integra a combinação 2). Neste último caso há, portanto, dois sistemas de equações de equilíbrio, cada um associado a uma das combinações de ações. O problema de otimização expresso em (2.12), transforma-se no problema apresentado em (2.30).

Figura 2.3 – Combinações de ações em otimização de topologia: (a) uma única carga aplicada; (b) duas cargas aplicadas simultaneamente; (c) cargas aplicadas em situações distintas.
Fonte: o autor



$$
\begin{array}{lcl}
Obter & \boldsymbol{\rho} & \\
Que\ minimiza & c\big(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{U_1}(\boldsymbol{\rho}), \mathbf{U_2}(\boldsymbol{\rho})\big) = \mathbf{F_1}^T\mathbf{U_1}(\boldsymbol{\rho}) + \mathbf{F_2}^T\mathbf{U_2}(\boldsymbol{\rho}) & \\
Talque & \Sigma\rho_e - f_v n_e = 0 & \\
 & \rho_{\boldsymbol{mín}} \leq \rho_e \leq 1 & e = 1 \ldots n_e \\
Com & \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\mathbf{U_1}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{F_1} & \\
 & \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\mathbf{U_2}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{F_2} & \\
 & E_e = E(\rho_e, E_o) &
\end{array}
\tag{2.30}
$$

Onde:

$\mathbf{F}_1$ – é o vetor de cargas nodais para a combinação de ações 1;

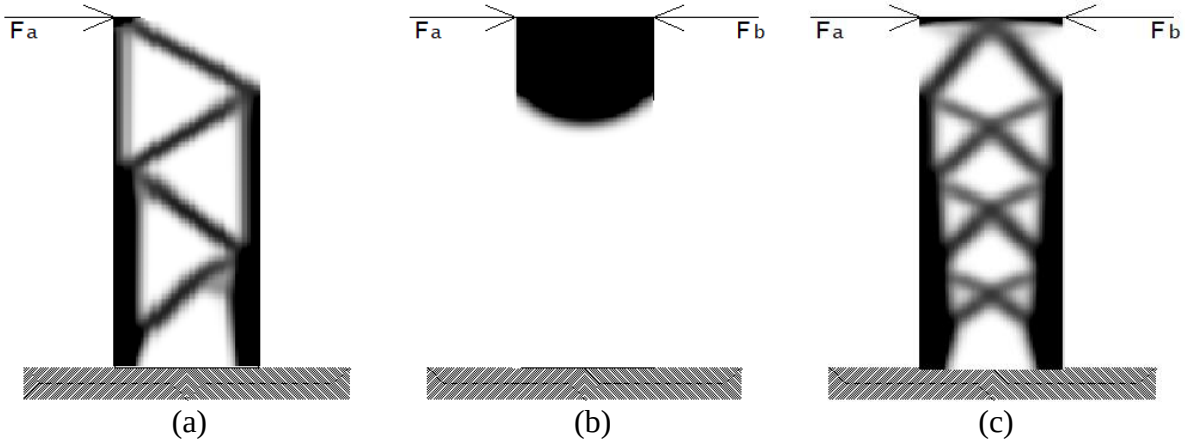
$\mathbf{F}_2$ – é o vetor de cargas nodais para a combinação de ações 2;

$\mathbf{U}_1$ – é o vetor de deslocamentos nodais devido à combinação de ações 1;

$\mathbf{U}_2$ – é o vetor de deslocamentos nodais devido à combinação de ações 2.

A Figura 2.3 apresenta os resultados do processo de otimização de topologia para os casos apresentados na Figura 2.2. Observa-se que a solução da Figura 2.4(a), obtida com a aplicação da carga F_A, não é adequada para a carga F_B. A solução da Figura 2.4(b), obtida com a aplicação simultânea das cargas F_A e F_B em uma única combinação de carga tampouco é adequada ao projeto. Observa-se que as duas cargas atuando simultaneamente formam um carregamento auto equilibrado, que prescinde das reações de apoio para o equilíbrio da estrutura. Assim, a solução fornecida pelo processo de otimização concentra material na região de aplicação das cargas e separa a estrutura do apoio. Esse tipo de solução é consistente com a forma com que as cargas foram consideradas e sua inadequação é resultado da forma inapropriada de consideração das ações. A solução da Figura 2.4(c) é consistente com a situação real de projeto. O fato de a mesma distribuição de material ser aplicada a ambas as situações de projeto se reflete na matriz de rigidez da estrutura, aplicada a ambas as combinações de carregamento na solução dos dois sistemas de equação expressos no problema (2.30).

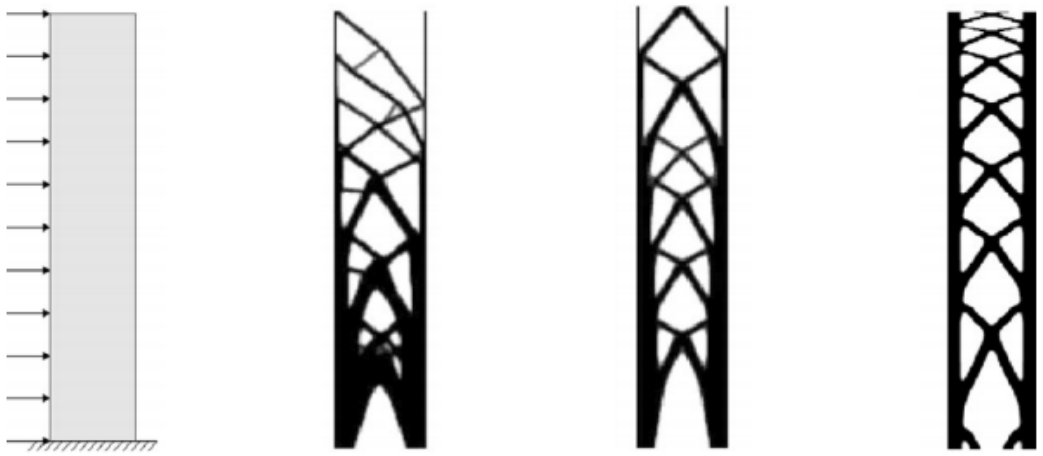
Figura 2.4 – Soluções para combinações de ações em otimização de topologia: (a) uma única carga aplicada; (b) duas cargas aplicadas simultaneamente; (c) cargas aplicadas em combinações distintas.
Fonte: o autor



Nas situações reais de projeto, as cargas oriundas do vento, possuem uma distribuição exponencial, atingindo seu valor máximo no topo da edificação, e zero no nível do solo. Contudo nas aplicações de otimização de topologia costuma-se optar pela aplicação pontual da carga oriunda das forças de vento. Isso se dá porque a existência da carga concentrada atrai material para suas imediações. Assim, para evitar que a própria inserção do carregamento influencie o leiaute, em geral faz-se uma primeira análise apenas com a carga concentrada no topo da edificação. Após a definição dos pontos de ligação, pode-se fazer outra análise com o carregamento mais discretizado.

Outra característica comum às soluções de otimização de topologia aplicada a edifícios é a grande concentração de material na base da edificação, fruto da geometria do domínio de projeto que gera naturalmente um elevado momento no apoio (base). A imposição de condições adicionais de projeto como simetria e repetição de padrão minoram o problema, mas não eliminam. Stromberget al. (2011) mostraram esse comportamento de concentração de material que resulta em um leiaute não aplicável na prática. Os autores simularam a ação do vento como cargas concentradas em pavimentos específicos da edificação (Figura 2.5 (a)). Assim pode visualizar os leiautes obtidos sem consideração de nenhuma restrição adicional (Figura 2.5 (b)), com imposição de simetria (Figura 2.5 (c)), e com imposição de simetria e de uma distribuição gradual de padrão (Figura 2.5 (d)). Observa-se que na Figura 2.5(c) e na Figura 2.5(d) a concentração de material na base é menor que na Figura 2.5(b). Contudo, observa-se uma maior concentração de material nos elementos verticais (pilares) que nos elementos inclinados de contraventamento.

Figura 2.5 – Cargas simultâneas em uma edificação devido ao vento: (a) a ação do vento como cargas concentradas em pavimentos; (b) leiaute sem consideração de nenhuma restrição adicional; (c) imposição de simetria no leiaute; (d) leiautes com imposição de simetria e distribuição gradual de padrão
Fonte: Stromberg et al. (2011)



(a) (b) (c) (d)

A transformação do problema descrito em (2.12) no problema descrito em (2.30) altera a sensibilidade da função objetivo em relação às variáveis de projeto, uma vez que a função objetivo foi alterada. No problema (2.30) a mesma densidade aparece nos dois termos da função objetivo, que pode ser escrita como:

$$\frac{\partial\, c\big(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho})\big)}{\partial\, \rho_e} = -\mathbf{U_1}(\boldsymbol{\rho})^{\mathbf{T}} \frac{\partial \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})}{\partial\, \rho_e} \mathbf{U_1}(\boldsymbol{\rho}) - \mathbf{U_2}(\boldsymbol{\rho})^{\mathbf{T}} \frac{\partial \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})}{\partial\, \rho_e} \mathbf{U_2}(\boldsymbol{\rho}) \tag{2.31}$$

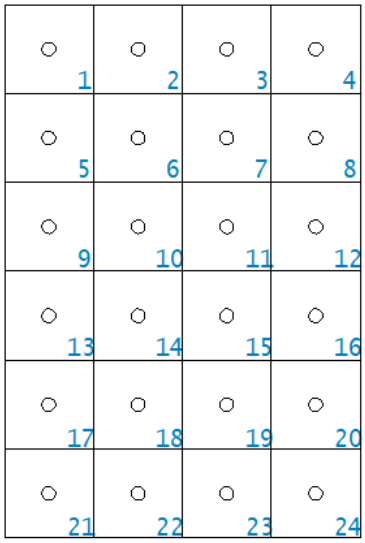
A sensibilidade da restrição de volume e a sensibilidade das restrições laterais não se alteram nos problemas apresentados em (2.12) e (2.30).

2.6. IMPOSIÇÃO DE SIMETRIA E REPETIÇÃO DE PADRÃO

Segundo Almeida, Paulino e Silva (2010), a formulação do problema de otimização topológica para obtenção de soluções simétricas se baseia na dissociação do conceito de variável de projeto do conceito de densidade no elemento. Assim, a mesma variável de projeto pode entrar na composição dos valores de densidades de vários elementos. Esse conceito já é aplicado aos esquemas de projeção usados para controle de instabilidades numéricas.

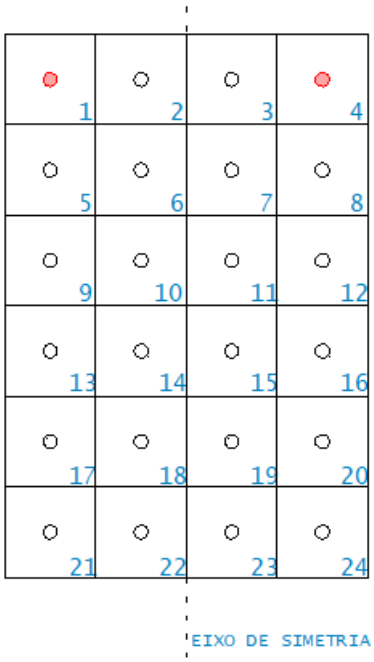
A Figura 2.6 apresenta um exemplo de malha com 24 elementos finitos retangulares para um domínio estendido também retangular. O círculo no interior de cada elemento representa o baricentro do elemento.

Figura 2.6 – Discretização do domínio estendido
Fonte: autor



Para imposição de simetria em relação ao eixo vertical Y é necessário identificar os elementos simétricos, como ilustrado na Figura 2.7 e conforme a equação (2.32). Em geral essa identificação é feita antes do início do processo de otimização.

Figura 2.7 – Identificação dos elementos simétricos
Fonte: autor



$$Se \quad X_i + X_j = 2\,X_s - X_j \; e \; Y_i = Y_j\,, \quad então \quad e_j\,, e_i \in \Omega_{S_k} \tag{2.32}$$

Sendo:

X_i – coordenada *x* do baricentro do elemento *i*;

X_j – coordenada *x* do baricentro do elemento *j*;

Y_i – coordenada *y* do baricentro do elemento *i*;

Y_j – coordenada *y* do baricentro do elemento *j*;

X_s – coordenada *x* do eixo de simetria;

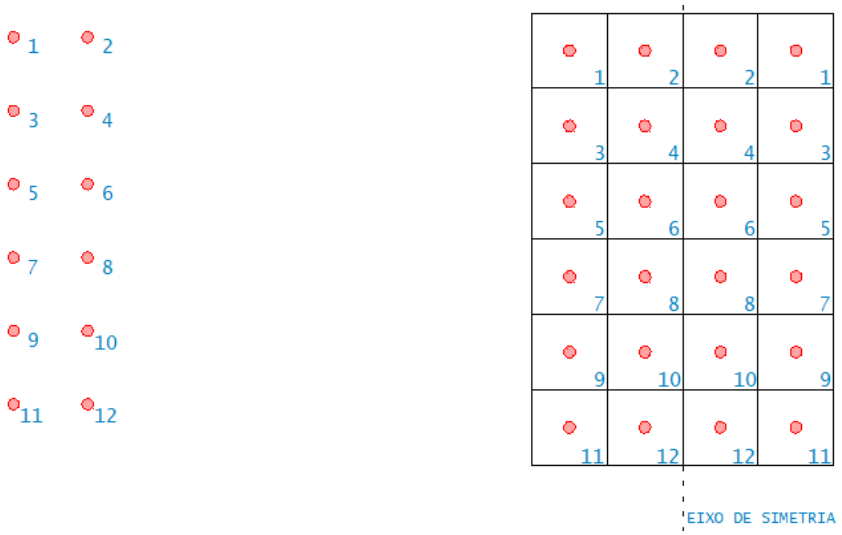
e_i – elemento *i*;

e_j – elemento *j*;

Ω_{Sk} – subconjunto *k* formado por um par de elementos simétricos.

Assim, durante o processo de otimização o mapeamento dos elementos simétricos é utilizado para, em cada iteração, atribuir as variáveis de projeto às densidades dos elementos obedecendo à pretendida simetria, conforme ilustrado na Figura 2.8(a) e representado na equação (2.33).

Figura 2.8 – Distribuição das variáveis de projeto no domínio discretizados, impondo simetria no eixo Y
Fonte: autor



(a) (b)

$$Se \quad e_i \in \Omega_{S_k}\,, \quad então \quad \rho_i = x_k \tag{2.33}$$

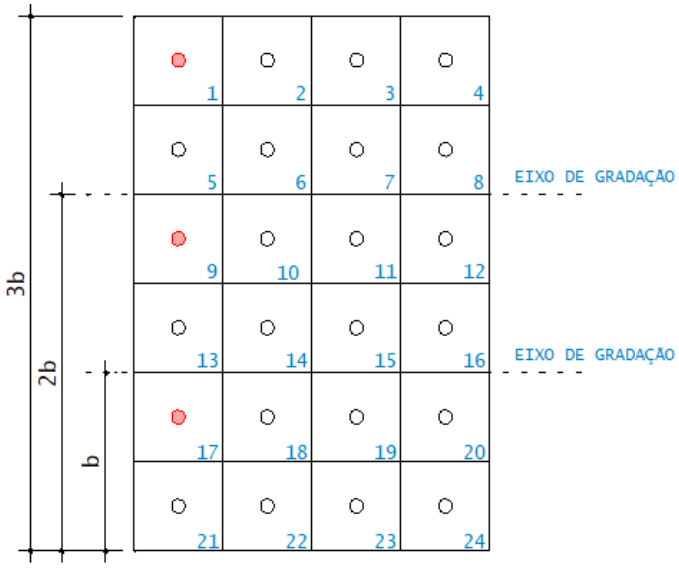
Sendo:

ρ_{ei}, ρ_{ej} – densidades dos elementos *i* e *j*;

x_k – variável de projeto *k* atribuída aos elementos simétricos *i* e *j*.

Da mesma maneira que o feito em relação à formulação para imposição de solução simétrica, a solução com repetição de padrão atribui cada valor de variável de projeto a vários elementos da malha de elementos finitos. Primeiramente é necessário identificar os elementos com as mesmas posições no padrão, como mostra a Figura 2.9, de acordo com a equação (2.34). Assim como no caso de imposição de simetria, em geral essa identificação é feita antes do início do processo de otimização.

Figura 2.9 – Identificação dos elementos em posição correspondente para imposição de repetição de padrão ao longo do eixo *Y*
Fonte: autor



$$Se \quad X_i = X_j \quad e \quad Y_i = Y_j - m\,b, \quad então \quad e_j\,, e_i \in \Omega_{P_k} \tag{2.34}$$

Sendo:

b – dimensão do padrão gradativo;

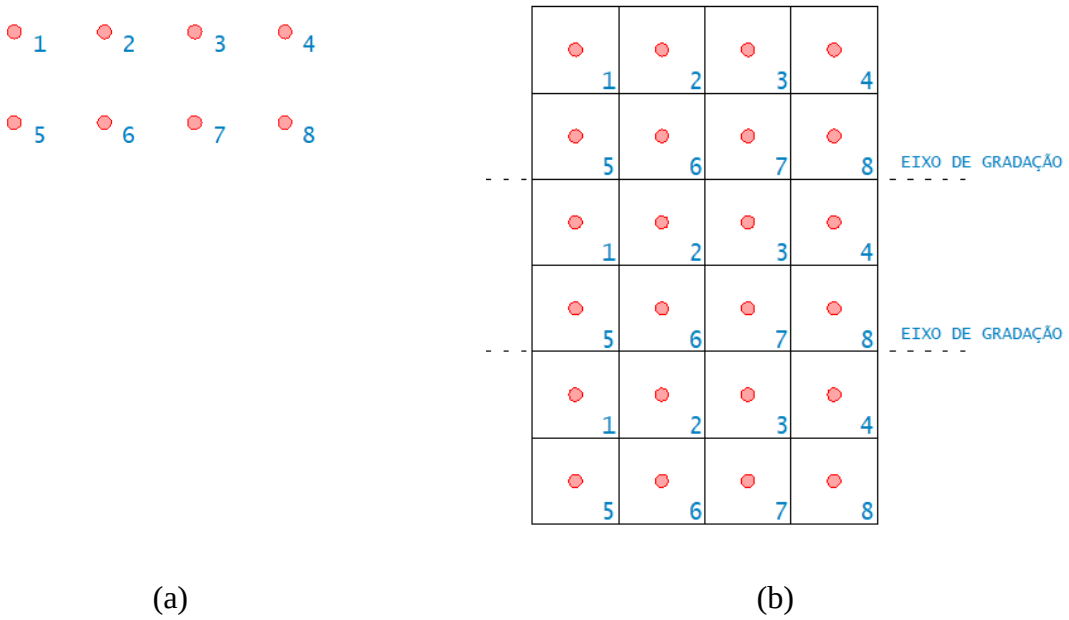
m – número do padrão;

Ω_{Pk} – subconjunto *k* formado pelos elementos em posições correspondentes no padrão.

Durante o processo de otimização o mapeamento dos elementos correspondentes no padrão, é utilizado para, em cada iteração, atribuir a todos a mesma variável de projeto (Figura 2.10(a)),

conforme a equação (2.35). Como resultado, obtém-se uma estrutura com menor tempo de processamento uma vez que reduz o número de variáveis, como mostra a Figura 2.10(b).

Figura 2.10 –Distribuição das variáveis de projeto no domínio discretizados, impondo repetição de padrão ao longo do eixo *Y*
Fonte: autor



$$Se \quad e_i \in \Omega_{P_k}, \quad então \quad \rho_i = x_k \tag{2.35}$$

Nos casos em que se deseje impor tanto simetria quanto repetição de padrão, determina-se primeiro o mapeamento dos elementos simétricos e depois mapeamento dos elementos formando o padrão. Assim, o problema de otimização impondo a obtenção de soluções simétricas e/ou com repetição de padrão é escrito conforme a equação (2.36).

$$\begin{aligned}
&Obter && \mathbf{x} \\
&Que\ minimiza && c\left(\mathbf{x}, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}))\right) = \mathbf{F}^T\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x})) \\
&Talque && \Sigma\rho_e - f_v\, n_e = 0 \\
& && \rho_{\boldsymbol{mín}} \leq \rho_e \leq 1 \qquad e = 1 \ldots n_e \\
&Com && \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho})\, \mathbf{U}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{F} \\
& && E_e = E(\rho_e, E_o) \\
& && \rho_e = \rho(\mathbf{x})
\end{aligned} \tag{2.36}$$

A equação da sensibilidade da flexibilidade, empregando o método analítico direto conforme Christensen e Klarbring (2009), utilizando a equação de equilíbrio, deve ser readequada quando se considera a simetria ou a repetições da padrões. No caso de imposição de simetria, a sensibilidade da função pode ser obtida utilizando a regra da cadeia, conforme a equação (2.37). Considerando a equação (2.33), a derivadas parciais das densidades dos elementos *i* e *j* em relação à variável de projeto x_k possuem valor unitário. Assim, a sensibilidade da função objetivo em relação à variável de projeto x_k reduz-se à equação (2.38).

$$\frac{\partial \mathrm{c}}{\partial\, x_k} = \frac{\partial \mathrm{c}}{\partial \rho_{e_i}} \frac{\partial \rho_{e_i}}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathrm{c}}{\partial \rho_{e_j}} \frac{\partial\, \rho_{e_j}}{\partial x_k} \quad , \quad e_j, e_i \in \Omega_{S_k} \tag{2.37}$$

$$\frac{\partial \mathrm{c}}{\partial x_k} = \frac{\partial \mathrm{c}}{\partial \rho_{e_i}} + \frac{\partial \mathrm{c}}{\partial \rho_{e_j}} \quad , \quad e_j, e_i \in \Omega_{S_k} \tag{2.38}$$

Sendo:

$\partial\rho_{ei}$ – derivada parcial em relação ao elemento e_i;

$\partial\rho_{ei}$ – derivada parcial em relação ao elemento e_j;

∂x_k – derivada parcial em relação a variável de projeto x_k.

No caso da imposição de repetição de padrão, a sensibilidade da função pode ser definida com a equação (2.39). Considerando a equação (2.35), as derivadas parciais das densidades dos elementos com correspondência no padrão em relação à variável de projeto x_k possuem valor unitário. O número de parcelas no somatório expresso em (2.39) depende do número de padrões. Assim, a sensibilidade da função objetivo em relação à variável de projeto x_k reduz-se à equação (2.40).

$$\frac{\partial \mathrm{c}}{\partial\, x_k} = \sum_{e_i \,\epsilon\, \Omega_{P_k}} \frac{\partial c}{\partial \rho_{e_i}} \frac{\partial \rho_i}{\partial x_k} \tag{2.39}$$

$$\frac{\partial \mathrm{c}}{\partial\, x_k} = \sum_{e_i \,\epsilon\, \Omega_{P_k}} \frac{\partial c}{\partial \rho_{e_i}} \tag{2.40}$$

2.7. ANÁLISE ESTRUTURAL VIA MEF

As relações de mecânica das estruturas podem ser escritas em forma matricial. Assim, a relação tensão x deformação pode ser expressa como na equação (2.41) e as equações diferenciais que relacionam deslocamentos e deformações como na equação (2.42).

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\,\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2.41}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\nabla}\mathbf{u} \tag{2.42}$$

Sendo:

$\boldsymbol{\sigma}$ – o vetor das tensões;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – o vetor das deformações;

$\mathbf{u}$ – o vetor dos deslocamentos em qualquer ponto da estrutura;

∇ – o operador diferencial.

Na aplicação realizada neste trabalho utiliza-se o MEF para análise estrutural, que se caracteriza pela discretização do domínio de projeto em uma malha formada elementos de geometria simples e pela representação do campo de deslocamentos por uma interpolação dos deslocamentos nodais por meio de funções simples, descrita genericamente pela equação (2.43).

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{N}_e\,\hat{\mathbf{u}}_e \tag{2.43}$$

Sendo:

$\mathbf{N}_e$ – a matriz das funções de interpolação do elemento;

$\mathbf{u}_e$ – o vetor dos deslocamentos no interior do elemento;

$\hat{\mathbf{u}}_e$ – o vetor dos deslocamentos nodais do elemento.

Substituindo-se a equação (2.43) na equação (2.42) obtém-se a relação de compatibilidade nodal apresentada em (2.44). Substituindo-se a equação (2.44) na equação (2.41) obtém-se a relação constitutiva elástica discreta apresentada em (2.45).

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}_e\,\hat{\mathbf{u}}_e \tag{2.44}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}_e\,\mathbf{B}_e\,\hat{\mathbf{u}}_e \tag{2.45}$$

Com:

$$\mathbf{B}_e = \mathbf{N}_e \, \hat{\mathbf{u}}_e \tag{2.46}$$

Sendo:

$\mathbf{B}_e$ – a matriz de compatibilidade cinemática do elemento.

A energia de interna de deformação iguala-se ao trabalho das forças externas conforme a equação (2.47).

$$\frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \, \boldsymbol{\sigma} \, dV = \frac{1}{2} \, \hat{\mathbf{U}}^T \, \hat{\mathbf{F}} \tag{2.47}$$

Sendo:

$\hat{\mathbf{U}}$ – o vetor dos deslocamentos nodais da estrutura;

$\hat{\mathbf{F}}$ – o vetor das forças equivalentes nodais da estrutura.

A equação (2.47) pode ser reescrita separando-se as parcelas de energia advindas de cada elemento conforme a equação (2.48).

$$\frac{1}{2}\sum_{e=1}^{n_e}\int_{V_e} \boldsymbol{\varepsilon}^T \, \boldsymbol{\sigma} \, dV = \frac{1}{2} \, \hat{\mathbf{U}}^T \, \hat{\mathbf{F}} \tag{2.48}$$

Os deslocamentos nodais nas equações (2.43) a (2.46) estão expressos no sistema local de coordenadas. A transformação desses deslocamentos para o sistema global de coordenadas (de toda a estrutura) são obtidos pela operação de rotação apresentada em (2.49).

$$\hat{\mathbf{u}}_{\boldsymbol{e}} = \mathbf{R}_{\boldsymbol{e}} \, \hat{\mathbf{U}}_{\boldsymbol{e}} \tag{2.49}$$

Sendo:

$\mathbf{R}_e$ – a matriz de rotação do elemento *e*;

$\hat{\mathbf{U}}_{\boldsymbol{e}}$ – o vetor dos deslocamentos nodais do elemento *e* no sistema global de coordenadas;

$\hat{\mathbf{u}}_{\boldsymbol{e}}$ – o vetor dos deslocamentos nodais do elemento *e* no sistema local de coordenadas.

Como os deslocamentos nodais dos elementos são um subconjunto dos deslocamentos nodais da estrutura, as relações expressas em (2.44) e (2.45) podem ser expandidas para abarcarem os deslocamentos nodais da estrutura pela inserção de zeros nas matrizes $\mathbf{E}_e$ e $\mathbf{B}_e$. Assim, substituindo-se (2.44), (2.45) e (2.49) expandidas em (2.48), obtém-se:

$$\widehat{\mathbf{U}}^T \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{R_e}^T \int_{V_e} \mathbf{B}_e{}^T\, \mathbf{E}_e\, \mathbf{B_e}\, dV\, \mathbf{R_e}\widehat{\mathbf{U}} \;=\; \widehat{\mathbf{U}}^T\, \widehat{\mathbf{F}} \tag{2.50}$$

Como a equação (2.50) é válida para qualquer valor do vetor de deslocamentos nodais, tem-se necessariamente:

$$\sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{R_e}^T \int_{V_e} \mathbf{B}_e{}^T \mathbf{E}_e \mathbf{B_e} dV\, \mathbf{R_e}\widehat{\mathbf{U}} \;=\; \widehat{\mathbf{F}} \tag{2.51}$$

O sistema de equações de equilíbrio é então escrito como apresentado em (2.52), com a matriz rigidez da estrutura, **K**, definida em (2.53):

$$\mathbf{K}\,\widehat{\mathbf{U}} \;=\; \widehat{\mathbf{F}} \tag{2.52}$$

$$\mathbf{K} \;=\; \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{R_e}^T \int_{V_e} \mathbf{B_e}^T\, \mathbf{E}_e\, \mathbf{B_e}\, dV\, \mathbf{R_e} \tag{2.53}$$

Cada parcela do somatório definido em (2.53) define a contribuição do elemento para a matriz de rigidez da estrutura. Assim, a matriz de rigidez do elemento, $\mathbf{k}_e$, no sistema local de coordenadas é definida na equação (2.54), enquanto a matriz de rigidez do elemento, $\mathbf{K}_e$, no sistema global de coordenadas é definida na equação (2.55).

$$\mathbf{k}_e \;=\; \int_{V_e} \mathbf{B}_e{}^T\, \mathbf{E}_e\, \mathbf{B}_e\, dV \tag{2.54}$$

$$\mathbf{K}_{\boldsymbol{e}} \;=\; \mathbf{R}_e^T\, \mathbf{k_e}\, \mathbf{R}_{\boldsymbol{e}} \tag{2.55}$$

Sendo:

$\mathbf{R}_e$ – matriz de rotação do elemento *e*;

$\mathbf{k}_e$ – matriz de rigidez do elemento *e* no sistema local de coordenadas;

$\mathbf{K}_e$ – matriz de rigidez do elemento *e* no sistema global de coordenadas.

As relações de energia também podem ser aplicadas em nível do elemento e assim, obtêm-se as equações de equilíbrio no nível do elemento como:

$$\mathbf{k}_e\,\hat{\mathbf{u}}_e = \hat{\mathbf{f}}_e \tag{2.55}$$

Sendo:

$\mathbf{k}_e$ – matriz de rigidez do elemento *e* no sistema local de coordenadas;

$\hat{\mathbf{u}}_e$ – vetor deslocamentos nodais do elemento *e* expresso no sistema local de coordenadas;

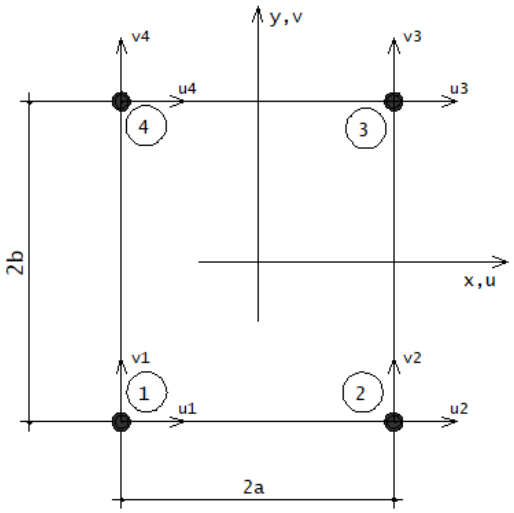
$\hat{\mathbf{f}}_e$ – vetor forças nodais no elemento *e* no sistema local de coordenadas.

A matriz de rigidez do elemento utilizada na montagem da matriz de rigidez da estrutura é obtida conforme a equação (2.51).

2.7.1. Aplicação ao elemento EPT-R4

Na aplicação realizada neste trabalho o domínio de projeto é representado por elementos retangulares com quatro nós formulados para estado plano de tensão (EPT-R4). Esses elementos têm dois graus de liberdade por nó, como mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 –Elemento EPT-R4
Fonte: autor



Em problemas de estado plano de tensões todas as tensões fora do plano *x-y* são nulas, as deformações γ_{xz} e γ_{yz} são nulas e a deformação ε_z pode ser calculada em função das deformações ε_x e ε_y. As relações entre tensões e deformações no plano *x-y* são apresentadas nas equações (2.56) a (2.58). Essas deformações podem ser representadas em forma matricial conforme a equação (2.59), que corresponde à equação genérica (2.41).

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)}\,(\varepsilon_x + \nu\,\varepsilon_y) \tag{2.56}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)}\,(\nu\,\varepsilon_x + \varepsilon_y) \tag{2.57}$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2\,(1+\nu)}\,\gamma_{xy} \tag{2.58}$$

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2}\begin{bmatrix}1 & \nu & 0\\ \nu & 1 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix} \tag{2.59}$$

Sendo:

σ_x – tensão normal na direção do eixo *x*;

σ_y – tensão normal na direção do eixo *y*;

τ_{xy} – tensão cisalhante do plano *x-y*;

E – módulo de elasticidade;

ν – coeficiente de Poisson;

ε_x – deformação normal na direção do eixo *x*;

ε_y – deformação normal na direção do eixo *y*;

γ_{xy} – deformação angular no plano *x-y*.

Assim, a matriz constitutiva elástica do elemento EPT-R4 a que se refere a equação (2.41) é apresentada na equação (2.60).

$$\mathbf{E}_e = \frac{E_e}{1-\nu^2}\begin{bmatrix}1 & \nu & 0\\ \nu & 1 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2}\end{bmatrix} \tag{2.60}$$

As relações de compatibilidade entre deformações e deslocamentos nos problemas de estado plano são apresentadas na equação (2.61), que corresponde à equação genérica (2.42).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} \tag{2.61}$$

Assim, o operador diferencial para EPT a que se refere a equação (2.42) é apresentada na equação (2.62).

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{2.62}$$

Os deslocamentos no interior do elemento são obtidos por interpolação dos deslocamentos nodais apresentados na Figura 2.10, conforme as equações (2.63) e (2.64).

$$u(x,y) = N_1(x,y)u_1 + N_2(x,y)u_2 + N_3(x,y)u_3 + N_4(x,y)u_4 \tag{2.63}$$

$$v(x,y) = N_1(x,y)v_1 + N_2(x,y)v_2 + N_3(x,y)v_3 + N_4(x,y)v_4 \tag{2.64}$$

Sendo:

$u(x,y)$ – deslocamento na direção do eixo x;

$v(x,y)$ – deslocamento na direção do eixo y;

$N_i(x,y)$– função interpolação associada ao nó j;

As funções de interpolação possuem propriedade de terem valor unitário na coordenada do nó ao qual está associada e valor nulo nas coordenadas dos demais nós. As funções de interpolação do elemento EPT-R4 são apresentadas nas equações (2.65) a (2.68).

$$N_1(x,y) = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{x}{a}\right)(1 - \frac{y}{b}) \tag{2.65}$$

$$N_2(x,y) = \frac{1}{4}\left(1 + \frac{x}{a}\right)(1 - \frac{y}{b}) \tag{2.66}$$

$$N_3(x,y) = \frac{1}{4}\left(1 + \frac{x}{a}\right)(1 + \frac{y}{b}) \tag{2.67}$$

$$N_4(x,y) = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{x}{a}\right)(1 + \frac{y}{b}) \tag{2.68}$$

Assim, as matrizes de compatibilidade cinemática e a matriz de rigidez do elemento EPT-R4 no sistema local de coordenadas são definidas, respectivamente, pelas equações (2.69) e (2.70).

$$\mathbf{B_e} = \frac{1}{4ab}\begin{bmatrix} -b+y & 0 & b-y & 0 & b+y & 0 & -b-y & 0 \\ 0 & -a+x & 0 & -a-x & 0 & a+x & 0 & a-x \\ -a+x & -b+y & -a-x & b-y & a+x & b+y & a-x & -b-y \end{bmatrix}$$

(2.69)

$$\mathbf{k}_{\boldsymbol{e}} = \int_{-b}^{b}\int_{-a}^{a} \mathbf{B}_{\boldsymbol{e}}{}^{T}\ \boldsymbol{E_e}\mathbf{B_e} dx\, dy \tag{2.70}$$

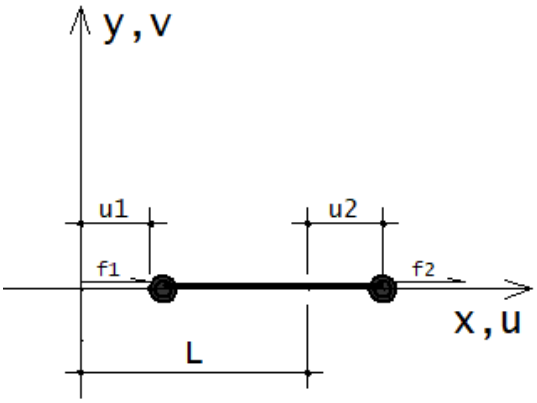
A matriz de rotação do elemento EPT-R4 é dada por:

$$\mathbf{R}_{\boldsymbol{e}} = \begin{bmatrix} cos\alpha & sen\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -sen\alpha & cos\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\alpha & sen\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -sen\alpha & cos\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & cos\alpha & sen\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -sen\alpha & cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & cos\alpha & sen\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -sen\alpha & cos\alpha \end{bmatrix} \tag{2.71}$$

2.7.2. Aplicação ao elemento TP2

Para representar os pilares é utilizado elemento TP2, que consiste em na barra apresentada na Figura 2.12.

Figura 2.12 –Representação do elemento TP2 no sistema local de coordenadas
Fonte: autor



Em problemas de compressão e tração uniforme a relação entre a tensão e deformação axiais é apresentada na equação (2.72). Nesse caso, a matriz constitutiva elástica a que se refere a genérica (2.41) se reduz a um único elemento.

$$\sigma_x = E\,\varepsilon_x \tag{2.72}$$

A relação de compatibilidade entre a deformação e o deslocamento axial é apresentada na equação (2.73), que corresponde à equação genérica (2.42).

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \left[\frac{\partial}{\partial x}\right]\{u(x)\} \tag{2.73}$$

O deslocamento axial no interior do elemento é obtido por interpolação dos deslocamentos nodais apresentados na Figura 2.11, conforme a equação (2.74).

$$u(x) = \mathbf{N}_e(x)\,\hat{\mathrm{u}}_{\boldsymbol{e}} \tag{2.74}$$

As funções de interpolação do elemento TP2 são apresentadas nas equações (2.75) e (2.76).

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{L_e} \tag{2.75}$$

$$N_2(x) = \frac{x}{L_e} \tag{2.76}$$

Sendo:

L_e - comprimento de elemento *e*.

Assim, as matrizes de compatibilidade cinemática e a matriz de rigidez do elemento TP2 no sistema local de coordenadas são definidas, respectivamente, pelas equações (2.77) e (2.78).

$$\mathbf{B}_{\boldsymbol{e}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_e} & \frac{1}{L_e} \end{bmatrix} \tag{2.77}$$

$$\mathbf{k}_{\boldsymbol{e}} = \int_0^{L_e} \mathbf{B}_{\boldsymbol{e}}{}^T\; E_e A_e \mathbf{B}_{\mathbf{e}} dx \tag{2.78}$$

A matriz de rotação do elemento TP2 é dada por:

$$\mathbf{R}_e = \begin{bmatrix} cos\alpha & sen\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\alpha & sen\alpha \end{bmatrix} \tag{2.79}$$

CAPÍTULO 3
ANÁLISE ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO PELO SOFTWARE TQS

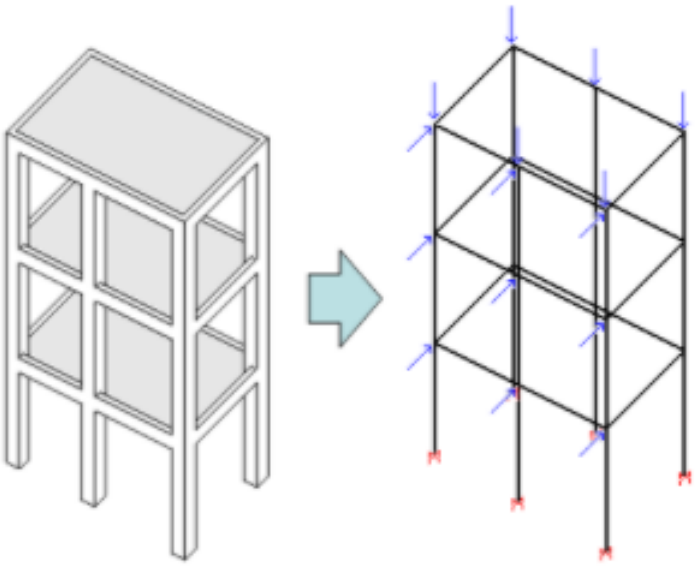
Este capítulo apresenta a metodologia empregada neste trabalho. Parte-se dos parâmetros da análise estrutural no TQS segundo os capítulos de seus manuais relativos à análise de estabilidade global (2021a) e aos parâmetros da análise estrutural (2021b). Em seguida, apresenta-se a caracterização estrutural do edifício *Kigdom Park Residence*, objeto de análise deste trabalho, e as variações estruturais estudadas com base nos resultados do trabalho de Stromberg *et al*. (2012).

3.1. ANÁLISE ESTRUTURAL PELO TQS

O *software* de análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas TQS faz a análise da estrutura do edifício por modelos de pórticos espaciais. O pórtico espacial é um sistema estrutural tridimensional composto por elementos lineares (barras) que possibilita a análise global do edifício. As análises do edifício implementadas no TQS baseiam-se nos critérios de combinação de carga, dimensionamento e detalhamento preconizados pela norma vigente, ABNT NBR 6118: 2014.

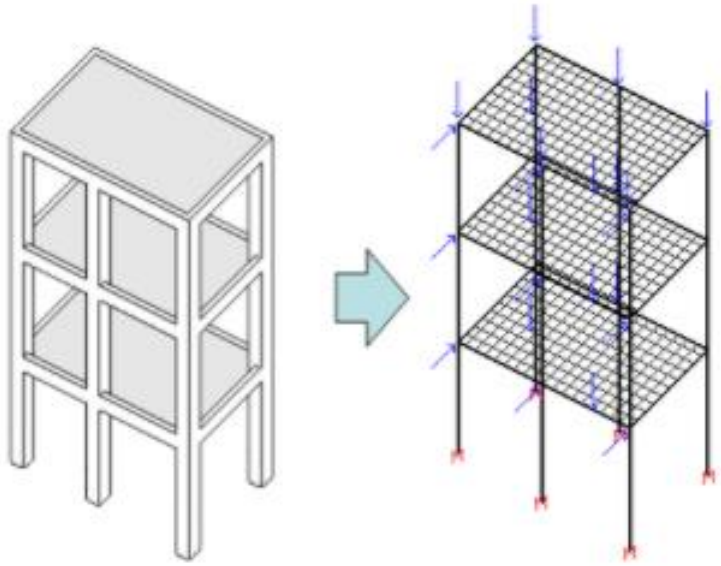
Em sua versão 22, o TQS utiliza dois modelos para análise de pórticos: o modelo IV e o modelo VI. No modelo IV o edifício é calculado como um pórtico composto por vigas e pilares (Figura 3.1) mais um modelo das lajes podendo ser representadas por grelhas ou por vigas contínuas equivalentes. Nesse modelo as ações verticais e as ações horizontais são atribuídas no pórtico representativo (vigas + pilares). Já nas lajes é considerado apenas efeitos das ações verticais (TQS INFORMÁTICA LTDA,2021b).

Figura 3.1 – Modelo IV TQS
Fonte: TQS INFORMÁTICA LTDA (2021b)



No modelo VI a estrutura é modelada como pórtico espacial representativo dos pilares, vigas e lajes (Figura 3.2). Nesse modelo as lajes passam a resistir parte dos esforços do vento (carga horizontal) (TQS INFORMÁTICA LTDA,2021).

Figura 3.2 – Modelo VI TQS
Fonte: TQS INFORMÁTICA LTDA (2021b)

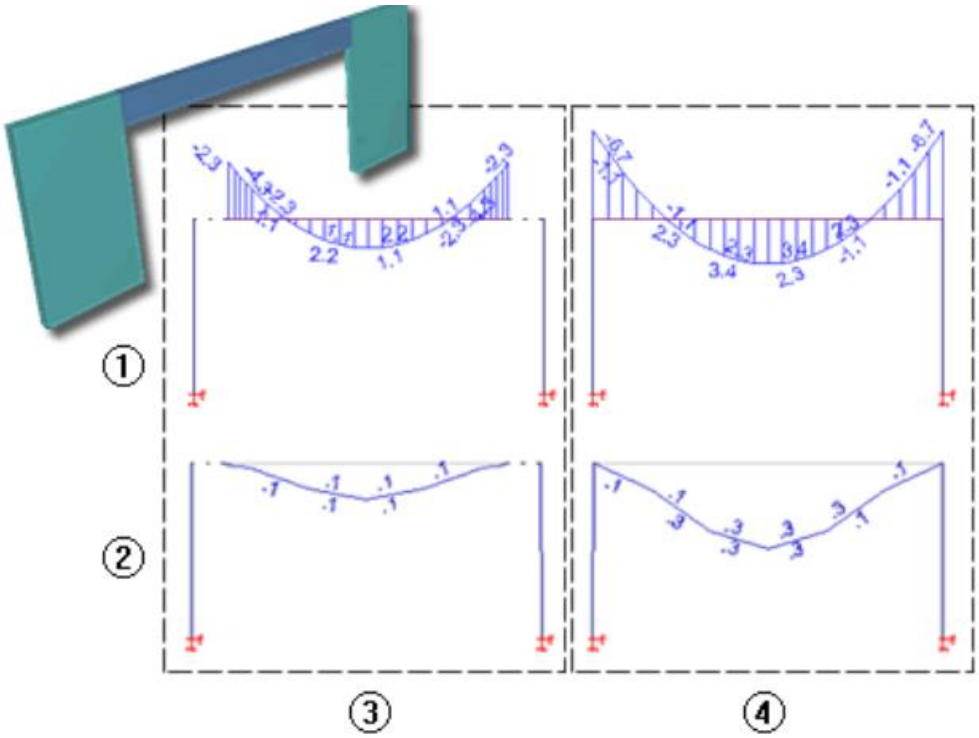


A TQS INFORMÁTICA LTDA (2021a) informa que o "Pórtico-TQS é um modelo adequado para simular o comportamento global de edifícios de concreto armado". Essa afirmação baseia-se no fato de que, diferentemente do pórtico espacial tradicional, o pórtico-TQS não considera todas as ligações puramente elásticas, que gera inconsistências com a realidade da execução,

principalmente em relação às ligações entre os elementos estruturais e a influência das dimensões dos elementos na capacidade de rotação dessas ligações. Assim os modelos do TQS consideram adaptações no modelo estrutural introduzidas com o fim de aproximar o modelo de cálculo da estrutura real.

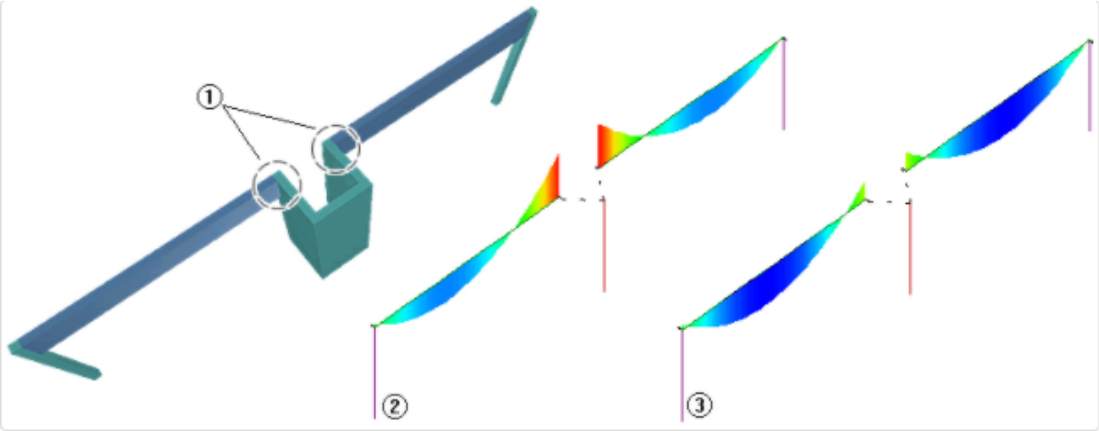
Na ligação viga-pilar as adaptações do pórtico-TQS consistem em modificações nos trechos rígidos e na flexibilização da ligação. Os trechos rígidos são regiões de intersecção dos elementos estruturais com elevada rigidez. A consideração dessas regiões se faz importante principalmente para as vigas, uma vez que ele determina os vãos teóricos da peça. No pórtico-TQS essa consideração é automática no cálculo em regiões de intersecção de pilares e vigas. Na Figura 3.3 podemos ver que a mudança do comprimento do vão influi nos diagramas de tensões.

Figura 3.3 – Vão teóricos em trechos rígidos
Fonte: TQS INFORMÁTICA LTDA (2021b)



Além da adequação dos vãos teóricos o software ajusta a rigidez efetiva das ligações. Na Figura 3.4 nota-se a flexibilização da ligação (rigidez efetiva) resulta em diagramas bem distintos

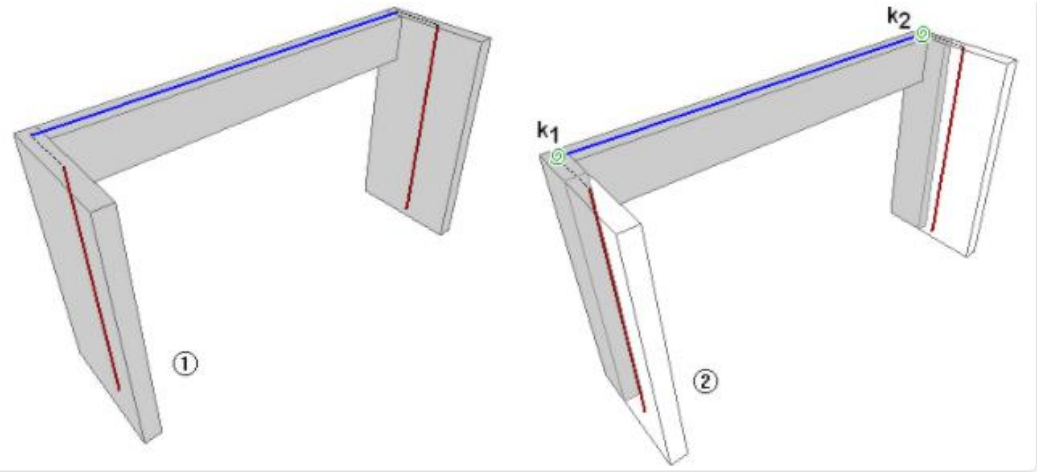
Figura 3.4 – Flexibilização da ligação viga-pilar
Fonte: TQS INFORMÁTICA LTDA (2021b)



- (1) Ligações pouco rígidas a flexão
- (2) Pórtico sem flexibilização
- (3) Pórtico com flexibilização

No modelo do programa computacional a flexibilização é considerada de forma automática associando "molas" nas ligações com o objetivo de simular o comportamento de uma ligação semirrígida manipulando a matriz de rigidez da estrutura, como podemos ver na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Associação de "molas" na ligação viga-pilar
Fonte: TQS INFORMÁTICA LTDA (2021b)



- (1) Pórtico sem flexibilização
- (2) Pórtico com flexibilização

As considerações do Sistema TQS também difere na análise de parâmetros de estabilidade global da estrutura. O coeficiente GamaZ é comumente utilizado para essa análise e calculado considerando cada caso isolado de vento definido no edifício (equação 3.1). Os deslocamentos horizontais provocados pelas cargas verticais **não** são considerados. Já no Sistemas TQS, além do GamaZ é calculado também o fator de amplificação de esforços horizontais (FAVt). Esse

fator considera combinação ELU da edificação, com a mesma formulação do coeficiente GamaZ. O que distingue os parâmetros é que o FAVt também considera os deslocamentos horizontais (deslocamentos provocados principalmente pelo vento) tentando dessa forma aproximar a estrutura dimensionada com sua situação real de uso, equação (3.2) (TQS INFORMÁTICA LTDA,2021).

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{\Delta M_{1\ tot,d}}} \tag{3.1}$$

Sendo:

γ_z - GamaZ;

$\Delta M_{tot,d}$ - Somatório dos produtos da força verticais pelos respectivos deslocamentos;

$\Delta M_{1\ tot,d}$ – Soma dos momentos de todas forças horizontais em relação a base da estrutura.

$$FAV_t = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{\Delta M_{1\ tot,d}}} \tag{3.2}$$

Sendo:

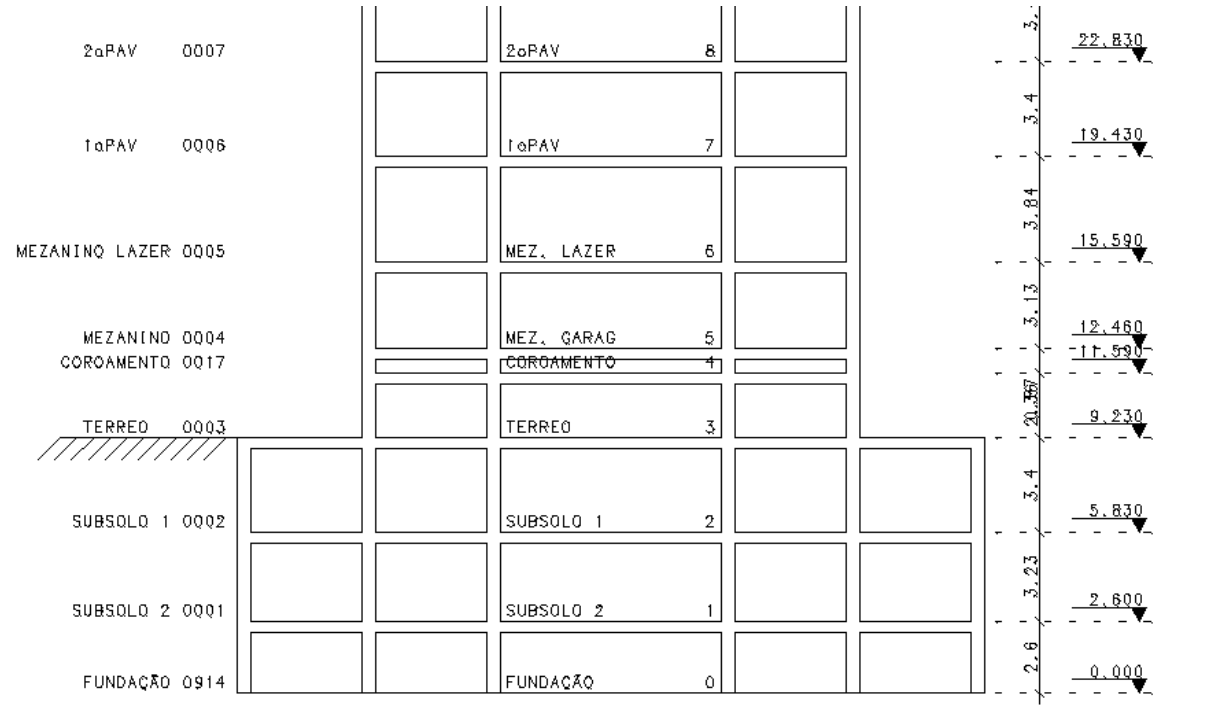
FAV_t - Fator de amplificação dos esforços horizontais;

$\Delta M_{tot,d}$ - Somatório dos produtos da força verticais pelos respectivos deslocamentos horizontais e das força horizontais com seus deslocamentos.

3.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO KIGDOOM PARK RESIDENCE

O projeto da edificação de uso residencial possui dois pavimentos subsolos, pavimento térreo, e um pavimento mezanino como pavimentos de garagem. Também possui um pavimento mezanino lazer e mais 45 pavimentos tipo e uma cobertura duplex. O sistema estrutural adotado é um pórtico espacial reticulado, composto de lajes maciças, vigas e pilares (modelo VI). Os pavimentos tipo têm dimensões em planta em torno de 30x20m. As fundações em blocos sobre estacas e estrutura de contenção em estacas justapostas. A Figura 3.6 ilustra o corte esquemático do edifício (COLMEIA C.P, 2016)

Figura 3.6 – Corte esquemático *Kingdom Park Residence*
Fonte: COLMEIA C.P. (2016)



O modelo estrutural adotado para análises e obtenção de esforços é o modelo VI do *software* TQS (COLMEIA C.P., 2016), onde é possível integrar no pórtico espacial, não apenas vigas e pilares, mas as grelhas que representam as lajes. Os parâmetros do concreto armado e armação, respeitando a classe de agressividade II, utilizado no projeto estrutural são mostrados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 –Parâmetros do concreto armado por pavimento
Fonte: COLMEIA C.P. (2016)

Dados do concreto	Resistência à Compressão aos 28 dias	50 MPa
	Módulo de Elásticidade mínimo	36 GPa
	Relação água/cimento máxima	0,60
Cobrimento das armaduras	Lajes	2,5 cm
	Vigas	2,5 cm
	Pilares	3 cm

As ações de projeto são separadas em permanentes, acidentais e excepcionais. Com as ações com atuação simultânea combinadas, considerando os ponderadores previstos pela ABNT NBR 6128: 2014, criam-se os carregamentos utilizados para a análise da estrutura. Foram consideradas 24 possibilidades para a incidência do vento (uma direção a cada 15º) sobre a face da estrutura.

A estrutura de contraventamento utilizada para reduzir os deslocamentos horizontais é um pórtico de contraventamento ao longo de todos os andares da edificação, cujo módulo básico é apresentado na Figura 3.7. Esse pórtico é localizado na fachada nordeste (Figura 3.8).

Figura 3.7 – Estrutura de contraventamento ao longo da fachada sudeste
Fonte: COLMEIA C.P. (2016)

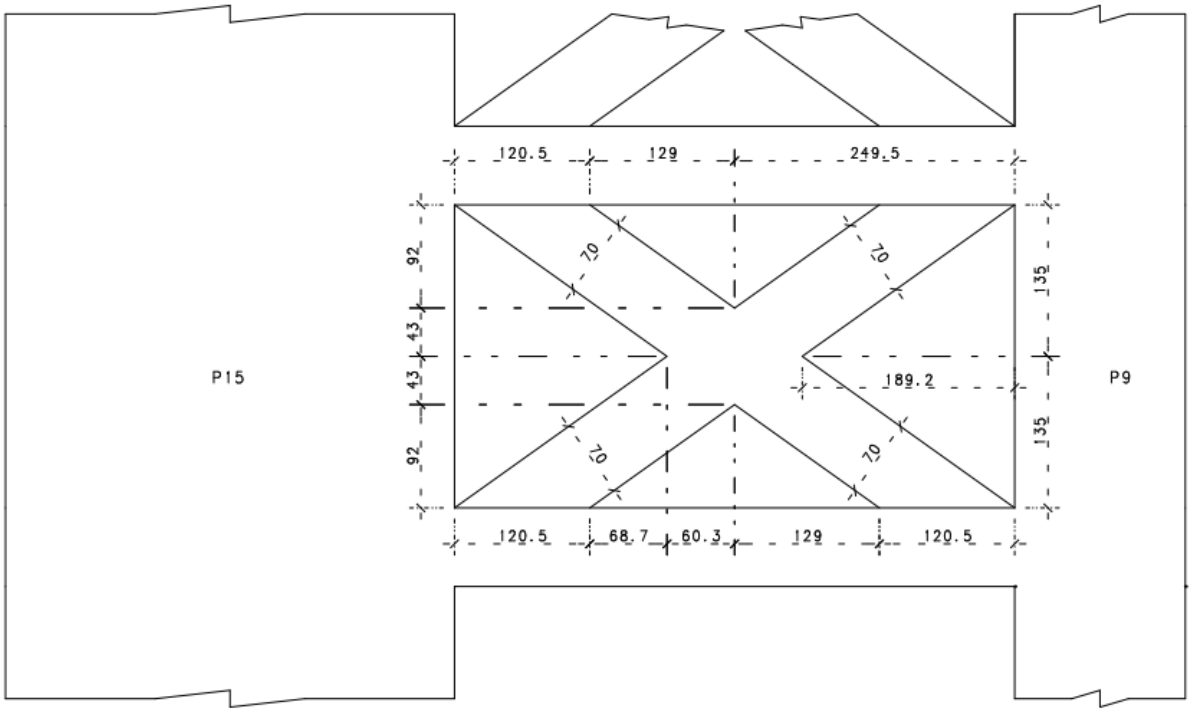
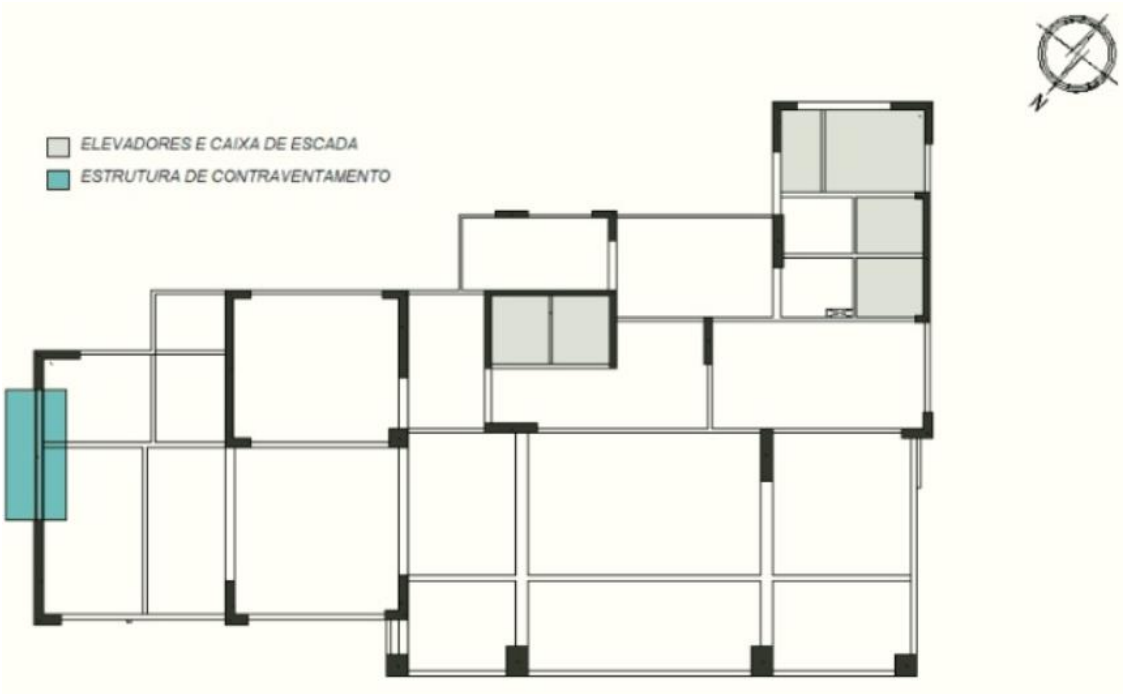


Figura 3.8 – Posição da estrutura de contraventamento em planta
Fonte: COLMEIA C.P. (2016)



O projeto estrutural do edifício de múltiplos pavimentos, a análise da estabilidade global se mostra de grande importância. Os parâmetros de estabilidade global, que permite avaliar o grau de deslocabilidade da estrutura e magnitude dos efeitos de segunda ordem sobre os de primeira ordem. Sendo o limite dos deslocamentos provocado pela ação do vento para combinação frequente, segundo a norma 6118:2014 conforme as equações 3.3 e 3.4.

$$DeslHc < \frac{H}{1700} \tag{3.3}$$

$$DeslHp < \frac{H_i}{850} \tag{3.4}$$

Sendo:

H - altura total do edifício;

H_i - distância entre pavimentos

A estrutura foi analisada sem a influência dos recalques de fundações e os parâmetros de estabilidade e deslocamentos do pórtico são mostrados no Anexo A e os valores médios dos casos de carregamento representados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 –Parâmetros médios dos casos de carregamento da estrutura implementada pela Colmeia C.P.
Fonte: COLMEIA C.P. (2016)

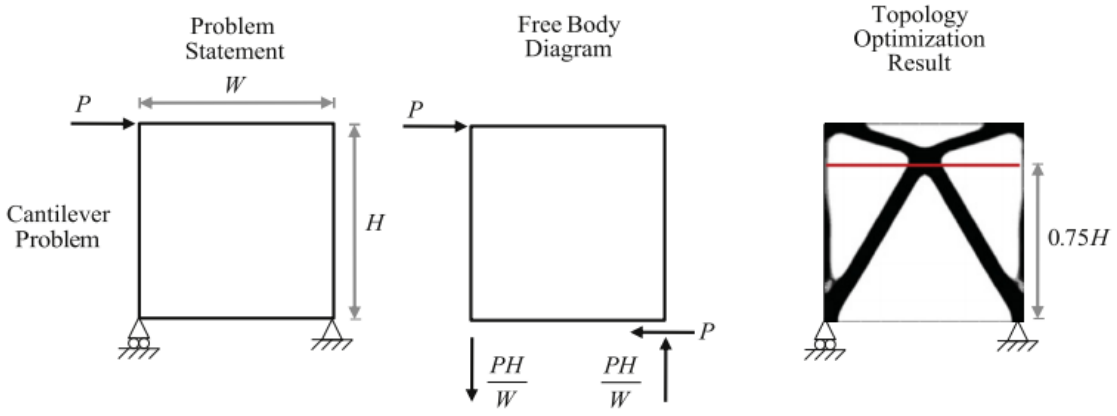
Parâmetros	**Modelo "X" Centralizada em um pavimento**
Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,168
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,171
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,171
Deslocamentos máximos (DeslHc)	8,329
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,146

3.3. ESTRUTURAS MODELADAS E ANALISADAS

Com o objetivo de não alterar critérios e partidos arquitetônicos, este trabalho limitou-se a introduzir alterações na estrutura de contraventamento, mantendo-a na mesma região definida

no projeto original e apresentada na Figura 3.8 e localizada nos pavimentos tipo da edificação. O estudo de Stromberg *et al*. (2012) indique que, à luz dos conceitos de otimização topológica pelo método da densidade, o padrão da estrutura de contraventamento mais eficiente apresenta forma em "X", mas com centro localizado à razão de 0,75 do padrão, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 –Posição da estrutura de contraventamento em planta
Fonte: Stromberg*et al*. (2012)



Conforme o levantamento realizado por Ali e Moon (2007), o sistema estrutural de contraventamento não precisa se limitar aos níveis de um único pavimento (Figura 1.1). Desse modo foram estudados 4 (quatro) outros modelos, além do implementado no projeto da Colmeia C.P. para o sistema estrutural de contraventamento. Foram utilizadas seções similares às adotadas no projeto da empresa, ou seja, com seção transversal de 22 cm x 70 cm.

Esses modelos são:

Modelo 1 - em "X", centralizados em um pavimento (implementado por Colmeia C.P., Figura 3.7);

Modelo 2 - em "X", com razão 0,75, conforme Stromberg *et al*. (2012), em um pavimento (Figura 3.10);

Modelo 3 - em "X", centralizado em dois pavimentos (Figura 3.11);

Modelo 4 - em "X", centralizado em quatro pavimentos (Figura 3.12);

Modelo 5 - em "X", com razão de 0,75, conforme Stromberg *et al*. (2012), em quatro pavimento (Figura 3.13)

Figura 3.10 – Modelo 2 em “X”, com razão 0,75, em um pavimento
Fonte: autor

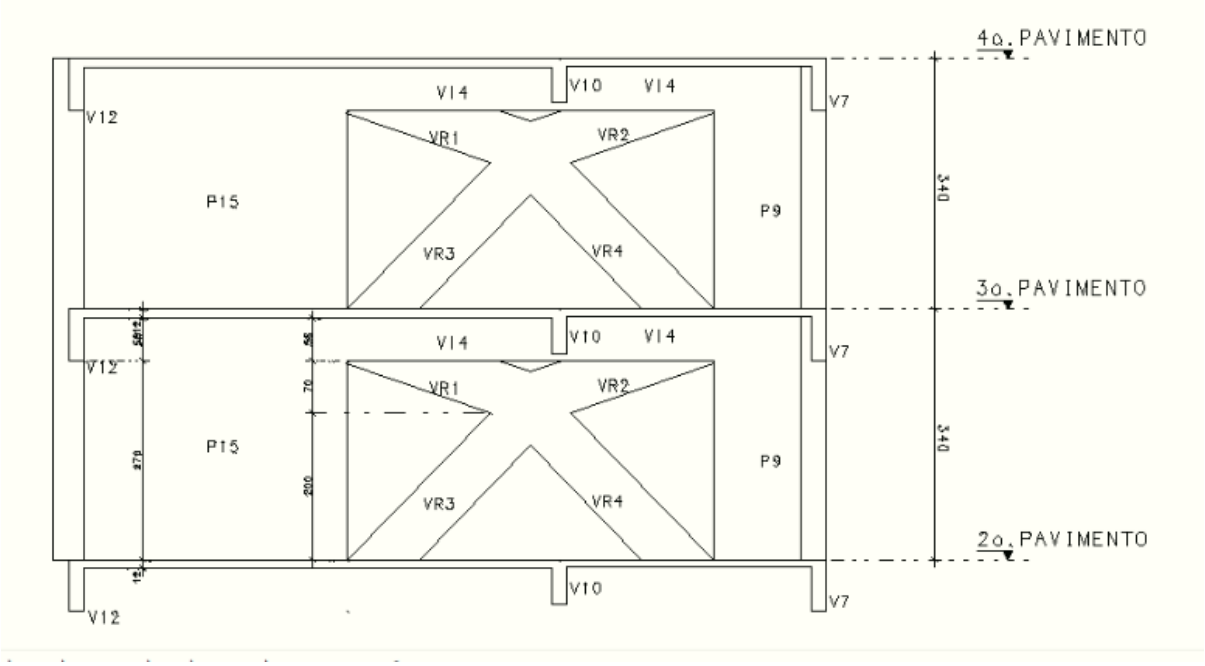


Figura 3.11 – Modelo 3 em “X”, centralizado em dois pavimentos
Fonte: autor

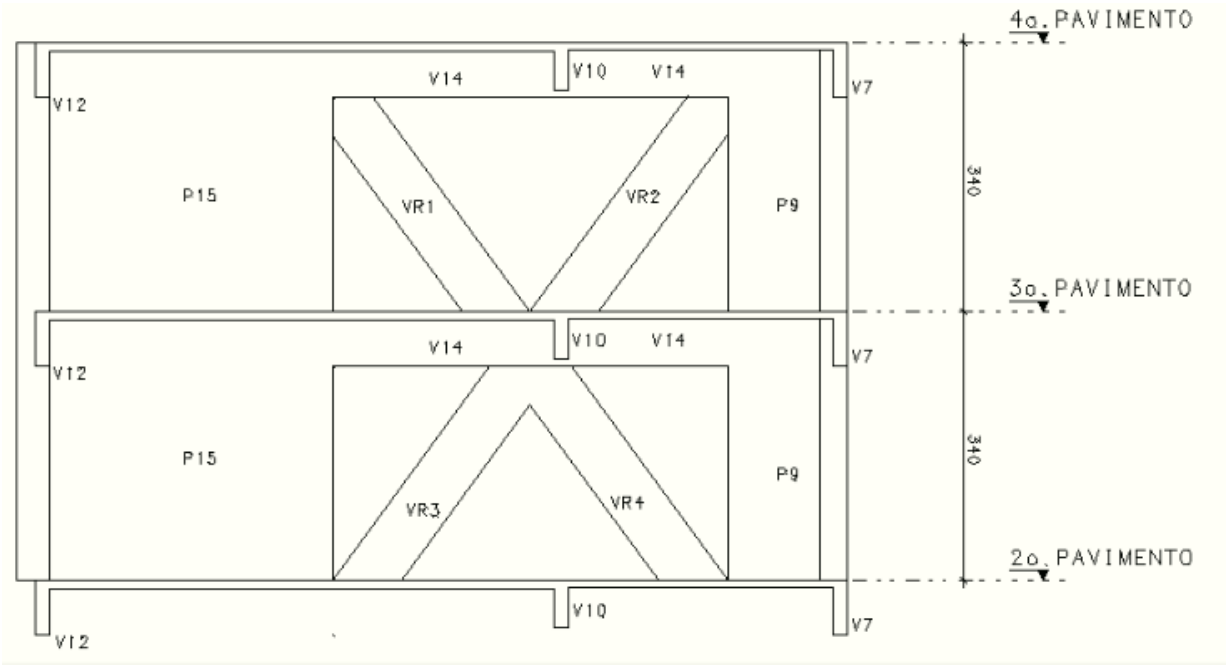


Figura 3.12 – Modelo 4 em "X", centralizado em quatro pavimentos
Fonte: autor

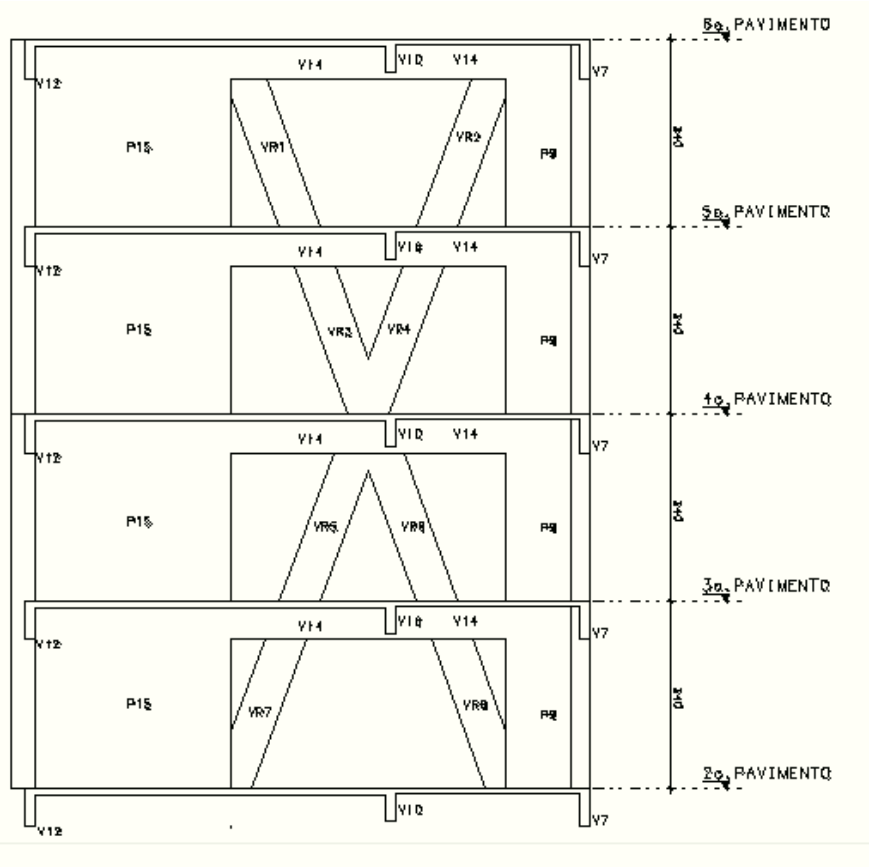
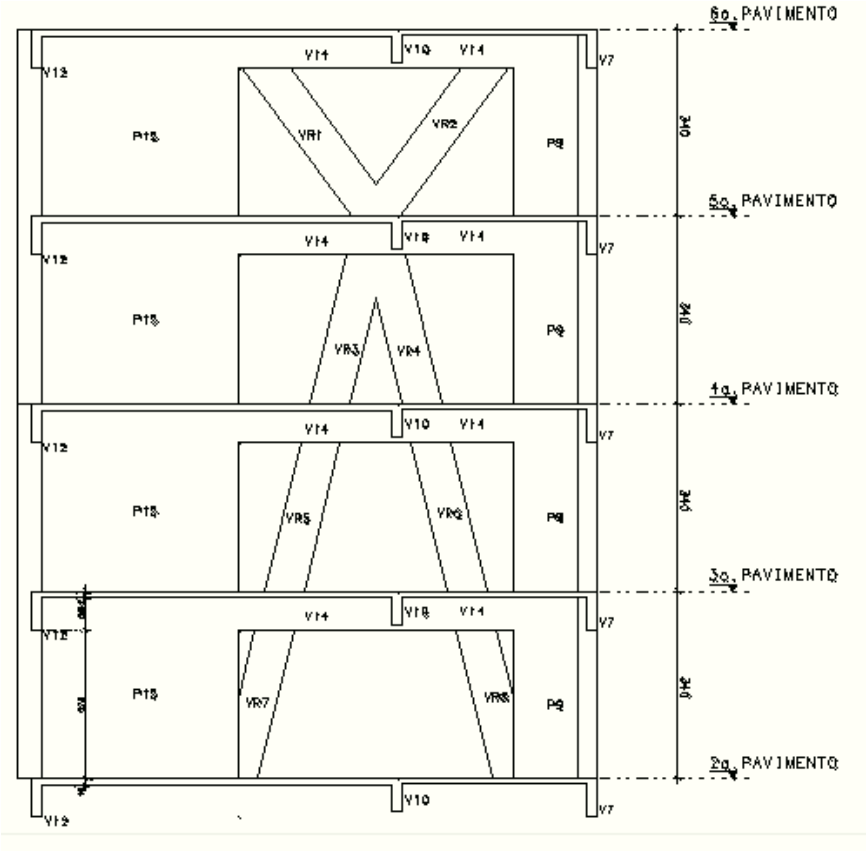


Figura 3.13 – Modelo 5 em “X”, com razão 0,75, em quatro pavimento
Fonte: autor



CAPÍTULO 4
RESULTADOS

Através da análise estrutural do software TQS foi possível determinar os parâmetros da edificação com cada modelo de contraventamento. As considerações de carregamentos, casos de carregamento horizontal e as combinações no Estado Limite Último (ELU) de vigas, lajes pilares e fundação estão no Anexo A deste trabalho.

Os parâmetros de estabilidade GamaZ para carregamentos simples de vento, parâmetros de estabilidade FAVt para combinação ELU e o deslocamentos de cada modelo em todos os casso de carregamento estão expressos no Anexo B. Os valores médios de cada estrutura de contraventamento estão representados dos Quadros 4.1 ao Quadro 4.4 relações dos valores médios com o modelo implementado pelo escritório de projeto no Quadro 4.5

Quadro 4.1 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 2 em "X", com razão 0,75, em um pavimento.
Fonte: autor

Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,168
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,171
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,171
Deslocamentos máximos (DeslHc)	7,800
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,125

Quadro 4.2 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 3 em "X", centralizado em dois pavimentos.
Fonte: autor

Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,185
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,190
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,190
Deslocamentos máximos (DeslHc)	8,088
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,133

Quadro 4.3 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 4 em "X", centralizado em quatro pavimentos
Fonte: autor

Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,189
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,194
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,194
Deslocamentos máximos (DeslHc)	8,125
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,133

Quadro 4.4 – Parâmetros de estabilidade e deslocamento do modelo 5 em "X", com razão 0,75, em quatro pavimento
Fonte: autor

Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,188
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,193
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,193
Deslocamentos máximos (DeslHc)	8,117
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,133

Quadro 4.5 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento de cada modelo de estrutura com o modelo implementado pelo escritório de projeto Colmeia C.P.
Fonte: autor

	Mod.2/Mod.1	Mod.3/Mod.1	Mod.4/Mod.1	Mod.5/Mod.1
Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,001	1,015	1,018	1,017
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,000	1,016	1,019	1,018
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,000	1,016	1,020	1,019
Deslocamentos máximos (DeslHc)	0,936	0,971	0,975	0,974
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,857	0,914	0,914	0,914

Em todas os modelos os valores médios de estabilidade (GamaZ e FAVt) são maiores que o desenvolvido pela empresa, mostrando que as soluções inspiradas na otimização de topologia fornecem bons resultados. No entanto, não foram feitas discussões dessas soluções executivas com a construtora, o que pode ter influído na solução do projetista.

As em maiores variações dos valores médios com os parâmetros desenvolvido pela empresa são do modelo 4, contraventamento em "X" centralizado quatro pavimentos. Contudo são valores próximos ao desenvolvido pelos projetistas. Já nos deslocamentos máximos da edificação e dos pisos houve uma redução dos valores, ou seja, a estrutura de contraventamento mostrou-se mais eficiente nesses parâmetros. Sendo que os deslocamentos máximos tiveram reduções menores. O modelo 2, em "X", com razão 0,75, em um pavimento, conforme o estudo de Stromberg et al. (2012), apresentou as maiores reduções de deslocamento entre piso.

Conforme esperado, ao compararmos o modelo 1 (contraventamento em um pavimento), com os modelos 3 (contraventamento em dois pavimentos) e 4 (contraventamento em quatro pavimentos) que possuem metodologia executiva semelhante ("X", centralizado), e com sistema de contraventamento maiores, resultaram em parâmetros de estabilidade maiores, pois há menos elementos de contraventamento. Porém houve redução dos deslocamentos, principalmente entre pavimentos, como está apresentado no Quadro 4.6. Mostrando que são soluções viáveis para esta situação.

Quadro 4.6 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento dos modelos 1, 3 e 4.
Fonte: autor

	Mod.3/Mod.1	Mod.4/Mod.1
Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,015	1,018
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,016	1,019
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,016	1,020
Deslocamentos máximos (DeslHc)	0,971	0,975
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,914	0,914

Semelhantemente, comparando os modelos de contraventamento com mesma tipologia executiva (sistema de contraventamento em "X" com razão de 0,75) com dimensões verticais distintas, os modelos que ocupam maiores pavimentos proporcionam maiores parâmetros de

estabilidade. Isso se nota também ao compara os modelos 2, que ocupa 1 pavimento, e o modelo 5, que ocupa 4 pavimentos (Quadro 4.7).

Quadro 4.7 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento dos modelos 2 com 5
Fonte: autor

	Mod.2/Mod.5
Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	0,984
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	0,982
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	0,982
Deslocamentos máximos (DeslHc)	0,961
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,938

Quando se analisa sistemas de contraventamento com a mesma dimensão vertical (modelo 1 com modelo 2 e modelo 4 com modelo 5) os modelos com contraventamento em "X" com razão de 0,75 apresentam menores valores de deslocamento máximos e deslocamentos entre pisos, com parâmetros de estabilidade semelhantes (Quadro 4.8), confirmando o estudo de Stromberg *et al*. (2012).

Quadro 4.8 – Relação dos parâmetros de estabilidade e deslocamento dos modelos 2 com 1 e dos modelos 5 com 4.
Fonte: autor

	Mod.2/Mod.1	Mod.5/Mod.4
Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento	1,001	0,999
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - vigas e lajes	1,000	0,999
Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU - pilares e fundações	1,000	0,999
Deslocamentos máximos (DeslHc)	0,936	0,999
Deslocamentos máximos entre pisos (DeslHp)	0,857	1,000

CAPÍTULO 5
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente cabe ressaltar que o edifício foi projetado por uma equipe especializada em edifícios altos, de uma empresa respeitada nesse segmento estrutural. Assim a edificação já possuía uma estrutura para reduzir os deslocamentos horizontais, que é um dos objetivos deste trabalho.

Contudo os modelos desenvolvidos apresentaram parâmetros de estabilidade e deslocamento máximo similares ao da Colmeia C.P. e com significativa redução dos deslocamentos entre pisos. Os modelos desenvolvidos e analisados são viáveis quanto a estrutura de contraventamento, contudo, não foram considerados parâmetros de análise os benefícios executivos e o consumo de material, apesar de seguir modelos semelhantes ao já desenvolvido pela empresa e executado em obra. Sendo essas análises executivas propostas de estudos futuros.

Como elementos estruturais do sistema de contraventamento, foram utilizadas vigas inclinadas com seção transversal com grandes dimensões (22cm x 70cm), conforme a estrutura desenvolvida pela empresa. Esse modelo (Modelo 1) apresenta estabilidade semelhante com todos os outros desenvolvidos, mostrando que a posição e dimensão dessas vigas pouco influenciou na estabilidade. Cabendo uma análise dimensional dos elementos estruturais. Assim como proposta para trabalhos futuros um estudo e análise com a otimização das seções transversais dos elementos estruturais de contraventamento de todos os 5 modelos mostrados neste trabalho.

Apesar do prédio se localizar em uma região bastante populosa de Goiânia, o edifício é o único com grandes dimensões, sendo sujeito a maiores cargas horizontais de vento. Assim sugere-se também como proposta para trabalhos futuros analise de ventos turbulentos e pelo parâmetro de estabilidade P-delta para cada modelo de edifício com os sistemas de contraventamento propostos

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ALI, M. M.; MOON, K. S. Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. **Architectural Science Review**, Sydney, v. 50, n. 3, p. 205-223, 2007.

ALMEIDA, S. R. M.; PAULINO, G. H.; SILVA, E. C. N. Layout and material gradation in topology optimization of functionally graded structures: a global-local approach. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 42, n. 6, 2010.

BEGHINI, L. L.; BEGHINI. A.; BAKER, W. F.; ASCE, F.; PAULINO, G. H.; ASCE, M.Integrated discrete/continuum topology optimization framework for stiffness or global stability of high-rise buildings. **Journal of Structural Engineering**, v. 141, 2015.

BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v. 71, n. 2, p. 197-224, 1988.

BENDSØE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, Berlin, v. 1, n. 4, 1989.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization**: theory, methods, and applications. 2. ed. New York: Springer, 370 p., 2003.

CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An Introduction to Structural Optimization**. 1. ed. Linköping: Springer Science, 2009. 211 p.

COLMEIA CONSULTORIA E PROJETO, LTDA. **Kingdom Residence Park**. Goiânia, 2016.

DEATON, J. D.; GRANDHI, R.V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 49, p. 1-38, 2014.

RAMOS JR., A. S.; PAULINO, G. H. Filtering structures out of ground structures – a discrete filtering tool for structural design optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 54, p. 95-116, 2016.

SANDERS, E. D.;RAMOS JR, S. A.; PAULINO, G. H. A maximum filter for the ground structure method: An optimization tool to harness multiple structural designs. **EngineeringStructures**,[s.l.],v. 151, p. 235-252, 2017.

SANDERS, E. D.; PEREIRA, A.; AGUILÓ, M. A.; PAULINO, G. H. PolyMat: an efficient matlab code for multi-material topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 58, p. 2727-2759, 2018.

SIGMUND, O. Morphology-based black and white filters for topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 33, n. 4-5, 2007.

SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 21, n. 2, 2001.

SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches: A comparative review. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 48, p. 1031-1055, 2013.

SIGMUND, O.; PETERSSON, J. Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local-minima. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 16, n. 1, p. 68-75, 1998.

STROMBERG. L. L.; BEGHINI. A.; BAKER, W. F.; PAULINO, G. H. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 43, n. 2, p. 165-180, 2011.

STROMBERG. L. L.; BEGHINI. A.; BAKER, W. F.; PAULINO, G. H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. **Engineering Structures**, v. 37, p. 106-124, 2012.

TORRES, I. A. **Otimização de topologiaaplicadaaoprojeto de edifícios altos**. 2014. Dissertação (MestradoemEngenharia Civil – Estruturas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Tqsdocs**: Estabilidade Global e 2ª Ordem. Goiânia, 13 abr. 2021. Disponível em: http://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3155&search=estabilidade%20global%20&language=pt-BR. Acesso em: 13 abr. 2021.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Tqsdocs**: Pórtico Espacial. Goiânia, 13 abr. 2021. Disponível em: http://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3150&language=pt-BR. Acesso em: 13 abr. 2021.

ZEGARD, T.; PAULINO, G. H. Grand — ground structure based topology optimization for arbitrary 2D domains using matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Berlin, v. 50, p. 861-882, 2014.

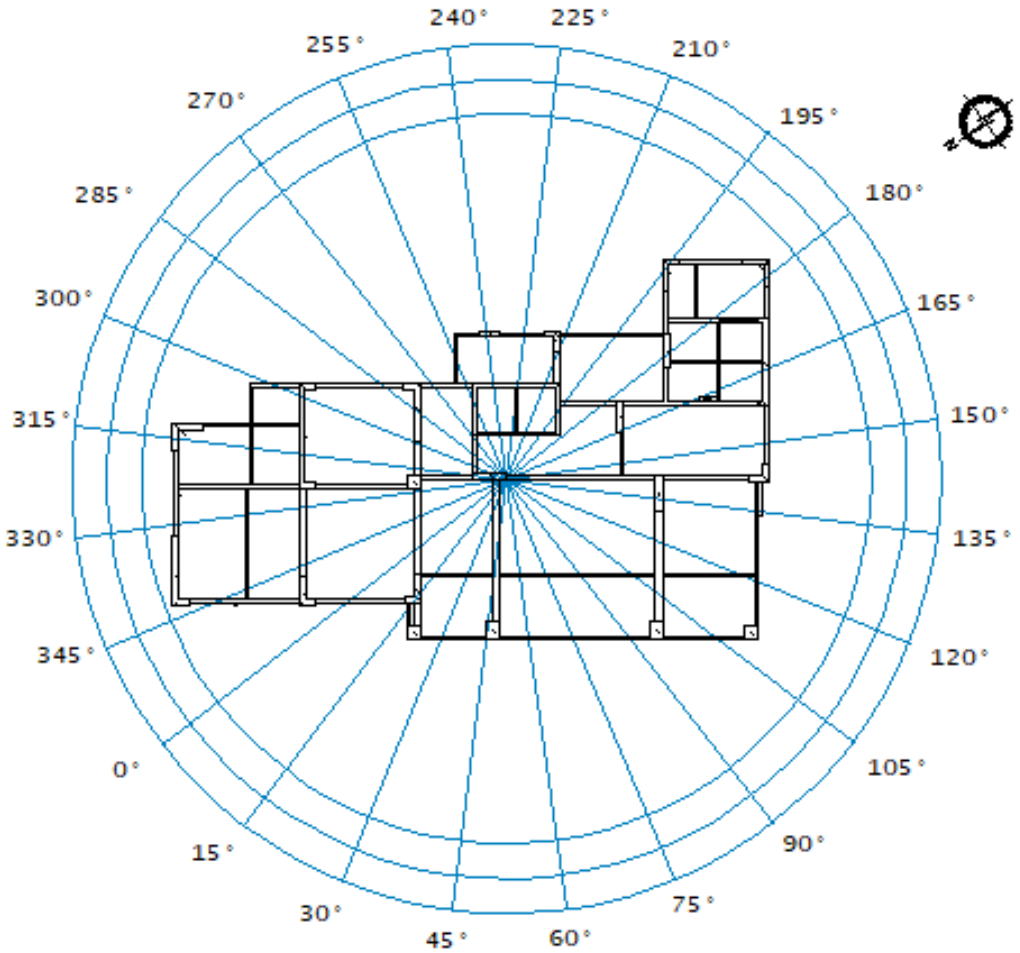
ZHANG, X. L.; PAULINO, G. H.; RAMOS JR, A. S. Multimaterial topology optimization with multiple volume constraints: Combining the ZPR update with a ground-structure algorithm to select a single material per overlapping set. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, *[s.l.]*, v. 114, p. 1053-1073, 2018.

ZHOU, M.; ROZVANY, G. I. N. The COC algorithm, part II: topological, geometrical and generalized shape optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.89, n. 1-3, p. 309-336, 1991.

ANEXO A

Este anexo apresenta, nos quadros A1 e A2, casos de carregamento no ELU para avaliação dos parâmetros de todos os modelos de contraventamento do edifício. Na Figura A1 é apresentado as direções da incidência de vento no edifício.

Figura A1 – Direções da incidência do vento na edificação.
Fonte: autor



Quadro A1 – Casos de Carregamento Horizontal.
Fonte: autor

Caso	Título	Caso	Título	Caso	Título	Caso	Título
5	Vento (1) 0°	11	Vento (7) 90°	17	Vento (13) 180°	23	Vento (19) 270°
6	Vento (2) 15°	12	Vento (8) 105°	18	Vento (14) 195°	24	Vento (20) 285°
7	Vento (3) 30°	13	Vento (9) 120°	19	Vento (15) 210°	25	Vento (21) 300°
8	Vento (4) 45°	14	Vento (10) 135°	20	Vento (16) 225°	26	Vento (22) 315°
9	Vento (5) 60°	15	Vento (11) 150°	21	Vento (17) 240°	27	Vento (23) 330°
10	Vento (6) 75°	16	Vento (12) 165°	22	Vento (18) 255°	28	Vento (24) 345°

Quadro A2 – Combinações de ELU de vigas, lajes, pilares e fundação. (continua)
Fonte: autor

Caso	Título
34	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT1
35	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT2
36	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT3
37	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT4
38	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT5
39	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT6
40	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT7
41	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT8
42	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT9
43	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT10

Quadro A2 – Combinações de ELU de vigas, lajes, pilares e fundação. (continuação)
Fonte: autor

Caso	Título
44	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT11
45	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT12
46	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT13
47	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT14
48	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT15
49	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT16
50	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT17
51	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT18
52	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT19
53	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT20
54	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT21
55	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT22
56	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT23
57	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+ACID+0.6VENT24
58	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT1
59	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT2
60	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT3
61	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT4
62	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT5
63	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT6
64	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT7
65	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT8
66	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT9

Quadro A2 – Combinações de ELU de vigas, lajes, pilares e fundação. (continuação)
Fonte: autor

Caso	Título
67	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT10
68	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT11
69	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT12
70	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT13
71	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT14
72	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT15
73	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT16
74	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT17
75	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT18
76	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT19
77	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT20
78	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT21
79	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT22
80	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT23
81	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP+PERM+0.5ACID+VENT24
85	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT1
86	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT2
87	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT3
88	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT4
89	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT5
90	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT6
91	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT7
92	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT8

Quadro A2 – Combinações de ELU de vigas, lajes, pilares e fundação. (continuação)
Fonte: autor

Caso	Título
93	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT9
94	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT10
95	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT11
96	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT12
97	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT13
98	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT14
99	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT15
100	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT16
101	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT17
102	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT18
103	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT19
104	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT20
105	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT21
106	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT22
107	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT23
108	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT24
109	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT1
110	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT2
111	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT3
112	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT4
113	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT5
114	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT6
115	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT7

Quadro A2 – Combinações de ELU de vigas, lajes, pilares e fundação. (final)
Fonte: autor

Caso	Título
116	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT8
117	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT9
118	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT10
119	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT11
120	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT12
121	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT13
122	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT14
123	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT15
124	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT16
125	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT17
126	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT18
127	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT19
128	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT20
129	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT21
130	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT22
131	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT23
132	ELU1/ACIDCOMB/0.93PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT24

ANEXO B

Este Anexo mostra os parâmetros de cada modelo, em cada caso, nos quadros B1 ao quadro B25.

Sendo:

Caso – caso simples de vento;

Ang – ângulo de vento (graus);

CTot – somatória de cargas verticais (tf - característico);

M2 – momento de 2a ordem das cargas verticais (tfm - característico);

CHor – cargas horizontais (tf - característico);

M1 – momento de 1a ordem das cargas horizontais (tfm - característico);

Mig – momento de desaprumo por imperfeições globais (tfm - característico);

γ_z – coeficiente de avaliação da importância dos esforços de 2a ordem globais para estruturas reticuladas.

Quadro B1 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 1.
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	Mig	γ_z
5	0	39202,4	2902,66	188,96	20812,78	2329,77	1,22
6	15	39202,4	2273,62	206,11	22509,91	2329,77	1,15
7	30	39202,4	3580,51	350,23	36443,63	2329,77	1,14
8	45	39202,4	4453,87	460,14	47409,83	2329,77	1,14
9	60	39202,4	4872,86	521,15	53170,39	2329,77	1,13
10	75	39202,4	6319,21	658,22	67095,11	2329,77	1,14
11	90	39202,4	6304,48	649,22	66195,84	2329,77	1,14
12	105	39202,4	5113	535,99	54545,29	2329,77	1,14
13	120	39202,4	5798,94	522,56	53414,15	2329,77	1,16
14	135	39202,4	6173,54	493,13	50417,01	2329,77	1,18
15	150	39202,4	5537,55	407,09	41410,12	2329,77	1,21
16	165	39202,4	4744,28	345,1	35200,18	2329,77	1,21
17	180	39202,4	5583,87	389,51	41614	2329,77	1,21
18	195	39202,4	5440,79	362,52	38238,33	2329,77	1,22
19	210	39202,4	4315,59	343,18	34960,24	2329,77	1,19
20	225	39202,4	3864,41	385,24	39746,07	2329,77	1,14
21	240	39202,4	3688,94	416,41	43106,33	2329,77	1,12
22	255	39202,4	4492,16	481,51	49848,83	2329,77	1,13
23	270	39202,4	6437,23	623,97	64766,78	2329,77	1,14
24	285	39202,4	7056,97	642,45	66670,66	2329,77	1,16
25	300	39202,4	6422,08	566,86	58325,73	2329,77	1,16
26	315	39202,4	6635,32	522,9	54369,31	2329,77	1,18
27	330	39202,4	6183,65	436,87	47161,05	2329,77	1,2
28	345	39202,4	5139,27	321,3	37117,96	2329,77	1,21

Quadro B2 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 2.
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	Mig	γ_z
5	0	43911,5	4648,13	347,83	35277,7	2601,86	1,2
6	15	43911,5	4163,37	368,62	36797	2601,86	1,17
7	30	43911,5	5235,23	547,97	50276,3	2601,86	1,15
8	45	43911,5	6023,8	694,18	62121,2	2601,86	1,14
9	60	43911,5	6377,57	775,8	68614	2601,86	1,13
10	75	43911,5	7260,35	916,08	77452,5	2601,86	1,14
11	90	43911,5	7299,16	897,28	75514,5	2601,86	1,14
12	105	43911,5	7423,67	813,18	72754,4	2601,86	1,15
13	120	43911,5	8365,82	810	73541,1	2601,86	1,17
14	135	43911,5	8752,04	771,21	70401	2601,86	1,19
15	150	43911,5	8071,49	656,88	60941,1	2601,86	1,2
16	165	43911,5	6793,28	549,61	50669,5	2601,86	1,21
17	180	43911,5	6229,29	548,41	47727,8	2601,86	1,2
18	195	43911,5	6013,17	525,05	46246,6	2601,86	1,2
19	210	43911,5	5725,31	540,94	49461,5	2601,86	1,17
20	225	43911,5	5748,61	619,29	57526,2	2601,86	1,15
21	240	43911,5	5732,29	671,07	62516,4	2601,86	1,13
22	255	43911,5	6166,84	739,39	67033,9	2601,86	1,13
23	270	43911,5	7324,98	872,04	74540,5	2601,86	1,14
24	285	43911,5	8492,56	919,63	79894	2601,86	1,16
25	300	43911,5	8715,9	854,29	76441,4	2601,86	1,17
26	315	43911,5	9007,93	800,98	72673,8	2601,86	1,19
27	330	43911,5	8380,63	686,66	64116,2	2601,86	1,2
28	345	43911,5	6889,81	525,8	51385,4	2601,86	1,21

Quadro B3 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 3.
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	Mig	γ_z
5	0	43839,9	3177,4	188,96	20812,8	2596,84	1,24
6	15	43839,9	2496,7	206,11	22509,9	2596,84	1,16
7	30	43839,9	3932	350,23	36443,6	2596,84	1,16
8	45	43839,9	4900,01	460,14	47409,8	2596,84	1,15
9	60	43839,9	5371,31	521,15	53170,4	2596,84	1,15
10	75	43839,9	6970,5	658,22	67095,1	2596,84	1,15
11	90	43839,9	6955,17	649,22	66195,8	2596,84	1,15
12	105	43839,9	5643,38	535,99	54545,3	2596,84	1,15
13	120	43839,9	6348,82	522,56	53414,2	2596,84	1,18
14	135	43839,9	6722,91	493,13	50417	2596,84	1,2
15	150	43839,9	6019,41	407,09	41410,1	2596,84	1,23
16	165	43839,9	5180,13	345,1	35200,2	2596,84	1,23
17	180	43839,9	6053,15	389,51	41614	2596,84	1,23
18	195	43839,9	5847,11	362,52	38238,3	2596,84	1,24
19	210	43839,9	4675,43	343,18	34960,2	2596,84	1,21
20	225	43839,9	4281,92	385,24	39746,1	2596,84	1,16
21	240	43839,9	4136,17	416,41	43106,3	2596,84	1,14
22	255	43839,9	5005,7	481,51	49848,8	2596,84	1,15
23	270	43839,9	7097,05	623,97	64766,8	2596,84	1,16
24	285	43839,9	7743,22	642,45	66670,7	2596,84	1,17
25	300	43839,9	7031,06	566,86	58325,7	2596,84	1,18
26	315	43839,9	7245,8	522,9	54369,3	2596,84	1,2
27	330	43839,9	6744,18	436,87	47161,1	2596,84	1,22
28	345	43839,9	5595,19	321,3	37118	2596,84	1,24

Quadro B4 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 4.
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	Mig	γ_z
5	0	44041,3	3193,06	188,96	20812,8	2610,81	1,24
6	15	44041,3	2519,29	206,11	22509,9	2610,81	1,17
7	30	44041,3	3974,27	350,23	36443,6	2610,81	1,16
8	45	44041,3	4962,61	460,14	47409,8	2610,81	1,15
9	60	44041,3	5452,86	521,15	53170,4	2610,81	1,15
10	75	44041,3	7082,49	658,22	67095,1	2610,81	1,16
11	90	44041,3	7075,34	649,22	66195,8	2610,81	1,16
12	105	44041,3	5760,67	535,99	54545,3	2610,81	1,16
13	120	44041,3	6461,74	522,56	53414,2	2610,81	1,18
14	135	44041,3	6812,61	493,13	50417	2610,81	1,21
15	150	44041,3	6069,5	407,09	41410,1	2610,81	1,23
16	165	44041,3	5201,44	345,1	35200,2	2610,81	1,23
17	180	44041,3	6085,09	389,51	41614	2610,81	1,23
18	195	44041,3	5863,14	362,52	38238,3	2610,81	1,24
19	210	44041,3	4693,51	343,18	34960,2	2610,81	1,21
20	225	44041,3	4346,39	385,24	39746,1	2610,81	1,16
21	240	44041,3	4249,31	416,41	43106,3	2610,81	1,14
22	255	44041,3	5158,99	481,51	49848,8	2610,81	1,15
23	270	44041,3	7255,71	623,97	64766,8	2610,81	1,17
24	285	44041,3	7883,36	642,45	66670,7	2610,81	1,18
25	300	44041,3	7142,92	566,86	58325,7	2610,81	1,18
26	315	44041,3	7325,79	522,9	54369,3	2610,81	1,21
27	330	44041,3	6798,11	436,87	47161,1	2610,81	1,22
28	345	44041,3	5631,09	321,3	37118	2610,81	1,24

Quadro B5 – Parâmetro de estabilidade (γz) para os carregamentos simples de vento – Modelo 5.
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	Mig	γ_z
5	0	44031,2	3191,93	188,96	20812,8	2610,2	1,24
6	15	44031,2	2514,94	206,11	22509,9	2610,2	1,17
7	30	44031,2	3964,83	350,23	36443,6	2610,2	1,16
8	45	44031,2	4947,24	460,14	47409,8	2610,2	1,15
9	60	44031,2	5431,77	521,15	53170,4	2610,2	1,15
10	75	44031,2	7053,95	658,22	67095,1	2610,2	1,15
11	90	44031,2	7044,93	649,22	66195,8	2610,2	1,16
12	105	44031,2	5730,81	535,99	54545,3	2610,2	1,15
13	120	44031,2	6435,51	522,56	53414,2	2610,2	1,18
14	135	44031,2	6794,38	493,13	50417	2610,2	1,21
15	150	44031,2	6062,28	407,09	41410,1	2610,2	1,23
16	165	44031,2	5201,45	345,1	35200,2	2610,2	1,23
17	180	44031,2	6083,09	389,51	41614	2610,2	1,23
18	195	44031,2	5865,13	362,52	38238,3	2610,2	1,24
19	210	44031,2	4692,55	343,18	34960,2	2610,2	1,21
20	225	44031,2	4331,67	385,24	39746,1	2610,2	1,16
21	240	44031,2	4221,07	416,41	43106,3	2610,2	1,14
22	255	44031,2	5120,83	481,51	49848,8	2610,2	1,15
23	270	44031,2	7217,27	623,97	64766,8	2610,2	1,17
24	285	44031,2	7850,17	642,45	66670,7	2610,2	1,18
25	300	44031,2	7116,97	566,86	58325,7	2610,2	1,18
26	315	44031,2	7309,48	522,9	54369,3	2610,2	1,21
27	330	44031,2	6789,16	436,87	47161,1	2610,2	1,22
28	345	44031,2	5626,47	321,3	37118	2610,2	1,24

Quadro B6 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- vigas e lajes (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	39202,4	1771,32	113,38	12487,7	1,16	1,22
35	15	39202,4	1352,77	123,66	13505,9	1,09	1,15
36	30	39202,4	2096,55	210,14	21866,2	1,09	1,14
37	45	39202,4	2583,74	276,09	28445,9	1,08	1,14
38	60	39202,4	2804,34	312,69	31902,2	1,08	1,13
39	75	39202,4	3649,5	394,93	40257,1	1,08	1,14
40	90	39202,4	3627,69	389,53	39717,5	1,08	1,14
41	105	39202,4	2910,39	321,6	32727,2	1,08	1,14
42	120	39202,4	3330,26	313,54	32048,5	1,1	1,16
43	135	39202,4	3573,5	295,88	30250,2	1,13	1,18
44	150	39202,4	3219,28	244,25	24846,1	1,14	1,21
45	165	39202,4	2777,74	207,06	21120,1	1,15	1,21
46	180	39202,4	3320,6	233,71	24968,4	1,15	1,21
47	195	39202,4	3275,88	217,51	22943	1,16	1,22
48	210	39202,4	2641,11	205,91	20976,1	1,13	1,19
49	225	39202,4	2407,23	231,15	23847,6	1,09	1,15
50	240	39202,4	2332,73	249,85	25863,8	1,07	1,13
51	255	39202,4	2837,32	288,91	29909,3	1,08	1,14
52	270	39202,4	4017,34	374,38	38860,1	1,09	1,15
53	285	39202,4	4391,59	385,47	40002,4	1,1	1,16
54	300	39202,4	4002,35	340,12	34995,4	1,11	1,17
55	315	39202,4	4111,81	313,74	32621,6	1,13	1,19
56	330	39202,4	3813,44	262,12	28296,6	1,15	1,21
57	345	39202,4	3152,39	192,78	22270,8	1,16	1,22

Quadro B6 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	39202,4	2924,96	188,96	20812,8	1,16	1,22
59	15	39202,4	2262,53	206,11	22509,9	1,09	1,15
60	30	39202,4	3536,78	350,23	36443,6	1,09	1,14
61	45	39202,4	4380,48	460,14	47409,8	1,08	1,14
62	60	39202,4	4774,81	521,15	53170,4	1,08	1,13
63	75	39202,4	6203,19	658,22	67095,1	1,08	1,14
64	90	39202,4	6178,39	649,22	66195,8	1,08	1,14
65	105	39202,4	4985,43	535,99	54545,3	1,08	1,14
66	120	39202,4	5678,59	522,56	53414,2	1,1	1,16
67	135	39202,4	6068,6	493,13	50417	1,13	1,18
68	150	39202,4	5455,18	407,09	41410,1	1,14	1,21
69	165	39202,4	4690,1	345,1	35200,2	1,15	1,21
70	180	39202,4	5561,57	389,51	41614	1,14	1,2
71	195	39202,4	5451,88	362,52	38238,3	1,16	1,22
72	210	39202,4	4359,32	343,18	34960,2	1,13	1,19
73	225	39202,4	3937,8	385,24	39746,1	1,09	1,14
74	240	39202,4	3786,98	416,41	43106,3	1,07	1,13
75	255	39202,4	4608,18	481,51	49848,8	1,08	1,13
76	270	39202,4	6563,32	623,97	64766,8	1,09	1,15
77	285	39202,4	7184,54	642,45	66670,7	1,1	1,16
78	300	39202,4	6542,43	566,86	58325,7	1,11	1,17
79	315	39202,4	6740,25	522,9	54369,3	1,13	1,19
80	330	39202,4	6266,02	436,87	47161,1	1,14	1,2
81	345	39202,4	5193,45	321,3	37118	1,16	1,22

Quadro B6 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- vigas e lajes (continuação). Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	39202,4	1796	113,38	12487,7	1,16	1,22
86	15	39202,4	1318,54	123,66	13505,9	1,09	1,15
87	30	39202,4	2005,74	210,14	21866,2	1,09	1,14
88	45	39202,4	2442,55	276,09	28445,9	1,08	1,14
89	60	39202,4	2622,39	312,69	31902,2	1,08	1,13
90	75	39202,4	3439,18	394,93	40257,1	1,08	1,14
91	90	39202,4	3403,33	389,53	39717,5	1,08	1,14
92	105	39202,4	2687,29	321,6	32727,2	1,08	1,14
93	120	39202,4	3123,63	313,54	32048,5	1,1	1,16
94	135	39202,4	3397,41	295,88	30250,2	1,13	1,18
95	150	39202,4	3085,73	244,25	24846,1	1,14	1,21
96	165	39202,4	2695,83	207,06	21120,1	1,15	1,21
97	180	39202,4	3295,92	233,71	24968,4	1,15	1,21
98	195	39202,4	3310,11	217,51	22943	1,16	1,22
99	210	39202,4	2731,91	205,91	20976,1	1,14	1,2
100	225	39202,4	2548,42	231,15	23847,6	1,1	1,16
101	240	39202,4	2514,69	249,85	25863,8	1,08	1,14
102	255	39202,4	3047,65	288,91	29909,3	1,09	1,15
103	270	39202,4	4241,69	374,38	38860,1	1,1	1,16
104	285	39202,4	4614,69	385,47	40002,4	1,11	1,17
105	300	39202,4	4208,98	340,12	34995,4	1,12	1,18
106	315	39202,4	4287,91	313,74	32621,6	1,14	1,2
107	330	39202,4	3946,99	262,12	28296,6	1,16	1,22
108	345	39202,4	3234,3	192,78	22270,8	1,17	1,23

Quadro B6 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- vigas e lajes (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	39202,4	2948,07	188,96	20812,8	1,16	1,22
110	15	39202,4	2238,78	206,11	22509,9	1,09	1,15
111	30	39202,4	3467,8	350,23	36443,6	1,09	1,14
112	45	39202,4	4270,97	460,14	47409,8	1,08	1,14
113	60	39202,4	4632,23	521,15	53170,4	1,08	1,13
114	75	39202,4	6037,25	658,22	67095,1	1,08	1,14
115	90	39202,4	6000,41	649,22	66195,8	1,08	1,14
116	105	39202,4	4807,54	535,99	54545,3	1,08	1,14
117	120	39202,4	5512,9	522,56	53414,2	1,1	1,16
118	135	39202,4	5926,41	493,13	50417	1,13	1,18
119	150	39202,4	5346,18	407,09	41410,1	1,14	1,21
120	165	39202,4	4621,71	345,1	35200,2	1,15	1,21
121	180	39202,4	5538,46	389,51	41614	1,15	1,21
122	195	39202,4	5475,63	362,52	38238,3	1,16	1,22
123	210	39202,4	4428,29	343,18	34960,2	1,13	1,19
124	225	39202,4	4047,31	385,24	39746,1	1,09	1,15
125	240	39202,4	3929,57	416,41	43106,3	1,07	1,13
126	255	39202,4	4774,12	481,51	49848,8	1,08	1,14
127	270	39202,4	6741,3	623,97	64766,8	1,1	1,15
128	285	39202,4	7362,43	642,45	66670,7	1,11	1,16
129	300	39202,4	6708,12	566,86	58325,7	1,11	1,17
130	315	39202,4	6882,44	522,9	54369,3	1,13	1,19
131	330	39202,4	6375,02	436,87	47161,1	1,15	1,21
132	345	39202,4	5261,83	321,3	37118	1,16	1,22

Quadro B7 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- vigas e lajes (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	43911,5	2808,16	208,7	21166,6	1,14	1,2
35	15	43911,5	2467,43	221,17	22078,2	1,11	1,17
36	30	43911,5	3062,74	328,78	30165,8	1,1	1,15
37	45	43911,5	3493,44	416,51	37272,7	1,08	1,14
38	60	43911,5	3671,48	465,48	41168,4	1,08	1,13
39	75	43911,5	4177,5	549,65	46471,5	1,08	1,14
40	90	43911,5	4189,31	538,37	45308,7	1,08	1,14
41	105	43911,5	4265,51	487,91	43652,7	1,09	1,15
42	120	43911,5	4845,14	486	44124,7	1,11	1,17
43	135	43911,5	5103,11	462,73	42240,6	1,13	1,19
44	150	43911,5	4731,1	394,13	36564,7	1,14	1,2
45	165	43911,5	4008,12	329,77	30401,7	1,15	1,21
46	180	43911,5	3718,29	329,05	28636,7	1,14	1,2
47	195	43911,5	3638,5	315,03	27748	1,14	1,2
48	210	43911,5	3513,58	324,57	29676,9	1,12	1,18
49	225	43911,5	3570,01	371,57	34515,7	1,09	1,15
50	240	43911,5	3594,44	402,64	37509,9	1,08	1,14
51	255	43911,5	3878,82	443,63	40220,3	1,08	1,14
52	270	43911,5	4585,17	523,22	44724,3	1,09	1,15
53	285	43911,5	5284,23	551,78	47936,4	1,11	1,16
54	300	43911,5	5403,89	512,57	45864,9	1,12	1,18
55	315	43911,5	5552,87	480,59	43604,3	1,13	1,19
56	330	43911,5	5140,17	412	38469,7	1,14	1,2
57	345	43911,5	4201,73	315,48	30831,3	1,15	1,21

Quadro B7 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	43911,5	4661,95	347,83	35277,7	1,14	1,2
59	15	43911,5	4135,97	368,62	36797	1,11	1,17
60	30	43911,5	5168,47	547,97	50276,3	1,1	1,15
61	45	43911,5	5922,24	694,18	62121,2	1,08	1,14
62	60	43911,5	6248,12	775,8	68614	1,08	1,13
63	75	43911,5	7111,84	916,08	77452,5	1,08	1,14
64	90	43911,5	7141,71	897,28	75514,5	1,08	1,14
65	105	43911,5	7268,01	813,18	72754,4	1,09	1,15
66	120	43911,5	8222,55	810	73541,1	1,11	1,17
67	135	43911,5	8630,93	771,21	70401	1,13	1,19
68	150	43911,5	7980,8	656,88	60941,1	1,14	1,2
69	165	43911,5	6739,19	549,61	50669,5	1,15	1,21
70	180	43911,5	6215,47	548,41	47727,8	1,14	1,2
71	195	43911,5	6040,58	525,05	46246,6	1,14	1,2
72	210	43911,5	5792,07	540,94	49461,5	1,12	1,18
73	225	43911,5	5850,17	619,29	57526,2	1,09	1,15
74	240	43911,5	5861,74	671,07	62516,4	1,08	1,14
75	255	43911,5	6315,36	739,39	67033,9	1,08	1,14
76	270	43911,5	7482,43	872,04	74540,5	1,09	1,15
77	285	43911,5	8648,22	919,63	79894	1,1	1,16
78	300	43911,5	8859,17	854,29	76441,4	1,11	1,17
79	315	43911,5	9129,03	800,98	72673,8	1,13	1,19
80	330	43911,5	8471,32	686,66	64116,2	1,14	1,2
81	345	43911,5	6943,9	525,8	51385,4	1,15	1,21

Quadro B7 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	43911,5	2856,13	208,7	21166,6	1,15	1,21
86	15	43911,5	2443,32	221,17	22078,2	1,11	1,17
87	30	43911,5	2968,19	328,78	30165,8	1,1	1,15
88	45	43911,5	3334,89	416,51	37272,7	1,08	1,14
89	60	43911,5	3459,74	465,48	41168,4	1,08	1,13
90	75	43911,5	3926,99	549,65	46471,5	1,08	1,14
91	90	43911,5	3917,12	538,37	45308,7	1,08	1,14
92	105	43911,5	3990,17	487,91	43652,7	1,09	1,15
93	120	43911,5	4585,43	486	44124,7	1,11	1,17
94	135	43911,5	4876,72	462,73	42240,6	1,13	1,19
95	150	43911,5	4553,46	394,13	36564,7	1,14	1,2
96	165	43911,5	3891,33	329,77	30401,7	1,15	1,21
97	180	43911,5	3670,32	329,05	28636,7	1,14	1,2
98	195	43911,5	3662,61	315,03	27748	1,14	1,2
99	210	43911,5	3608,13	324,57	29676,9	1,12	1,18
100	225	43911,5	3728,56	371,57	34515,7	1,1	1,16
101	240	43911,5	3806,18	402,64	37509,9	1,09	1,15
102	255	43911,5	4129,32	443,63	40220,3	1,09	1,15
103	270	43911,5	4857,36	523,22	44724,3	1,1	1,16
104	285	43911,5	5559,56	551,78	47936,4	1,11	1,17
105	300	43911,5	5663,6	512,57	45864,9	1,13	1,19
106	315	43911,5	5779,26	480,59	43604,3	1,14	1,2
107	330	43911,5	5317,81	412	38469,7	1,15	1,21
108	345	43911,5	4318,52	315,48	30831,3	1,16	1,22

Quadro B7 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- vigas e lajes (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	43911,5	4706,75	347,83	35277,7	1,14	1,2
110	15	43911,5	4121,86	368,62	36797	1,11	1,17
111	30	43911,5	5096,41	547,97	50276,3	1,1	1,15
112	45	43911,5	5797,14	694,18	62121,2	1,08	1,14
113	60	43911,5	6078,51	775,8	68614	1,08	1,13
114	75	43911,5	6909,27	916,08	77452,5	1,08	1,14
115	90	43911,5	6919,99	897,28	75514,5	1,08	1,14
116	105	43911,5	7042,25	813,18	72754,4	1,09	1,15
117	120	43911,5	8008,14	810	73541,1	1,11	1,17
118	135	43911,5	8442,47	771,21	70401	1,13	1,19
119	150	43911,5	7831,14	656,88	60941,1	1,14	1,2
120	165	43911,5	6638,52	549,61	50669,5	1,15	1,21
121	180	43911,5	6170,66	548,41	47727,8	1,14	1,2
122	195	43911,5	6054,68	525,05	46246,6	1,14	1,2
123	210	43911,5	5864,12	540,94	49461,5	1,12	1,18
124	225	43911,5	5975,27	619,29	57526,2	1,09	1,15
125	240	43911,5	6031,35	671,07	62516,4	1,08	1,14
126	255	43911,5	6517,92	739,39	67033,9	1,08	1,14
127	270	43911,5	7704,14	872,04	74540,5	1,09	1,15
128	285	43911,5	8873,98	919,63	79894	1,11	1,16
129	300	43911,5	9073,58	854,29	76441,4	1,12	1,18
130	315	43911,5	9317,49	800,98	72673,8	1,14	1,19
131	330	43911,5	8620,98	686,66	64116,2	1,15	1,21
132	345	43911,5	7044,57	525,8	51385,4	1,15	1,21

Quadro B8 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- vigas e lajes (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	43839,9	1948,32	113,38	12487,7	1,19	1,25
35	15	43839,9	1490,47	123,66	13505,9	1,11	1,16
36	30	43839,9	2302,74	210,14	21866,2	1,1	1,16
37	45	43839,9	2838,48	276,09	28445,9	1,09	1,15
38	60	43839,9	3083,12	312,69	31902,2	1,09	1,15
39	75	43839,9	4014	394,93	40257,1	1,09	1,15
40	90	43839,9	3987,64	389,53	39717,5	1,1	1,15
41	105	43839,9	3196,05	321,6	32727,2	1,09	1,15
42	120	43839,9	3627,74	313,54	32048,5	1,12	1,18
43	135	43839,9	3872,99	295,88	30250,2	1,14	1,2
44	150	43839,9	3482,64	244,25	24846,1	1,17	1,23
45	165	43839,9	3019,62	207,06	21120,1	1,17	1,23
46	180	43839,9	3590,01	233,71	24968,4	1,17	1,23
47	195	43839,9	3515,81	217,51	22943	1,18	1,24
48	210	43839,9	2861,71	205,91	20976,1	1,15	1,21
49	225	43839,9	2670,67	231,15	23847,6	1,11	1,17
50	240	43839,9	2621,37	249,85	25863,8	1,09	1,15
51	255	43839,9	3171,72	288,91	29909,3	1,1	1,16
52	270	43839,9	4443,69	374,38	38860,1	1,11	1,17
53	285	43839,9	4835,91	385,47	40002,4	1,12	1,18
54	300	43839,9	4400,19	340,12	34995,4	1,13	1,19
55	315	43839,9	4508,23	313,74	32621,6	1,15	1,21
56	330	43839,9	4175,51	262,12	28296,6	1,17	1,23
57	345	43839,9	3445,57	192,78	22270,8	1,18	1,25

Quadro B8 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	43839,9	3211,2	188,96	20812,8	1,18	1,24
59	15	43839,9	2489,64	206,11	22509,9	1,11	1,16
60	30	43839,9	3884,56	350,23	36443,6	1,1	1,16
61	45	43839,9	4815,43	460,14	47409,8	1,09	1,15
62	60	43839,9	5255,34	521,15	53170,4	1,09	1,15
63	75	43839,9	6831,05	658,22	67095,1	1,09	1,15
64	90	43839,9	6801,75	649,22	66195,8	1,1	1,15
65	105	43839,9	5486,44	535,99	54545,3	1,09	1,15
66	120	43839,9	6199,05	522,56	53414,2	1,12	1,18
67	135	43839,9	6590,52	493,13	50417	1,14	1,2
68	150	43839,9	5913,42	407,09	41410,1	1,17	1,23
69	165	43839,9	5107,77	345,1	35200,2	1,17	1,23
70	180	43839,9	6019,35	389,51	41614	1,17	1,23
71	195	43839,9	5854,17	362,52	38238,3	1,18	1,24
72	210	43839,9	4722,87	343,18	34960,2	1,15	1,21
73	225	43839,9	4366,5	385,24	39746,1	1,1	1,16
74	240	43839,9	4252,14	416,41	43106,3	1,09	1,14
75	255	43839,9	5145,14	481,51	49848,8	1,09	1,15
76	270	43839,9	7250,47	623,97	64766,8	1,11	1,17
77	285	43839,9	7900,16	642,45	66670,7	1,12	1,18
78	300	43839,9	7180,82	566,86	58325,7	1,13	1,19
79	315	43839,9	7378,19	522,9	54369,3	1,15	1,21
80	330	43839,9	6850,16	436,87	47161,1	1,17	1,23
81	345	43839,9	5667,55	321,3	37118	1,18	1,24

Quadro B8 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- vigas e lajes (continuação). Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	43839,9	1991,81	113,38	12487,7	1,19	1,25
86	15	43839,9	1461,8	123,66	13505,9	1,11	1,16
87	30	43839,9	2203,86	210,14	21866,2	1,1	1,16
88	45	43839,9	2676,12	276,09	28445,9	1,09	1,15
89	60	43839,9	2868,35	312,69	31902,2	1,09	1,15
90	75	43839,9	3761,45	394,93	40257,1	1,09	1,15
91	90	43839,9	3714,54	389,53	39717,5	1,1	1,15
92	105	43839,9	2920,99	321,6	32727,2	1,09	1,15
93	120	43839,9	3369,48	313,54	32048,5	1,12	1,18
94	135	43839,9	3649,12	295,88	30250,2	1,14	1,2
95	150	43839,9	3308,43	244,25	24846,1	1,17	1,23
96	165	43839,9	2906,93	207,06	21120,1	1,17	1,23
97	180	43839,9	3546,52	233,71	24968,4	1,17	1,23
98	195	43839,9	3544,49	217,51	22943	1,18	1,24
99	210	43839,9	2960,6	205,91	20976,1	1,16	1,22
100	225	43839,9	2833,03	231,15	23847,6	1,12	1,18
101	240	43839,9	2836,14	249,85	25863,8	1,1	1,16
102	255	43839,9	3424,26	288,91	29909,3	1,11	1,17
103	270	43839,9	4716,79	374,38	38860,1	1,12	1,18
104	285	43839,9	5110,97	385,47	40002,4	1,13	1,19
105	300	43839,9	4658,45	340,12	34995,4	1,14	1,2
106	315	43839,9	4732,1	313,74	32621,6	1,17	1,23
107	330	43839,9	4349,73	262,12	28296,6	1,18	1,24
108	345	43839,9	3558,26	192,78	22270,8	1,19	1,26

Quadro B8 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- vigas e lajes (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	43839,9	3252,54	188,96	20812,8	1,19	1,25
110	15	43839,9	2472,01	206,11	22509,9	1,11	1,16
111	30	43839,9	3809,16	350,23	36443,6	1,1	1,16
112	45	43839,9	4687,4	460,14	47409,8	1,09	1,15
113	60	43839,9	5083,41	521,15	53170,4	1,09	1,15
114	75	43839,9	6626,93	658,22	67095,1	1,09	1,15
115	90	43839,9	6579,35	649,22	66195,8	1,1	1,15
116	105	43839,9	5260,92	535,99	54545,3	1,09	1,15
117	120	43839,9	5985,79	522,56	53414,2	1,12	1,18
118	135	43839,9	6404,04	493,13	50417	1,14	1,2
119	150	43839,9	5766,43	407,09	41410,1	1,17	1,23
120	165	43839,9	5010,28	345,1	35200,2	1,17	1,23
121	180	43839,9	5978,01	389,51	41614	1,17	1,23
122	195	43839,9	5871,81	362,52	38238,3	1,18	1,24
123	210	43839,9	4798,27	343,18	34960,2	1,15	1,21
124	225	43839,9	4494,53	385,24	39746,1	1,11	1,17
125	240	43839,9	4424,07	416,41	43106,3	1,09	1,15
126	255	43839,9	5349,26	481,51	49848,8	1,1	1,16
127	270	43839,9	7472,87	623,97	64766,8	1,11	1,17
128	285	43839,9	8125,68	642,45	66670,7	1,12	1,18
129	300	43839,9	7394,09	566,86	58325,7	1,13	1,19
130	315	43839,9	7564,67	522,9	54369,3	1,15	1,22
131	330	43839,9	6997,16	436,87	47161,1	1,17	1,23
132	345	43839,9	5765,03	321,3	37118	1,18	1,25

Quadro B9 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- vigas e lajes (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	44041,3	1954,29	113,38	12487,7	1,19	1,25
35	15	44041,3	1497,46	123,66	13505,9	1,11	1,17
36	30	44041,3	2318,85	210,14	21866,2	1,1	1,16
37	45	44041,3	2864,72	276,09	28445,9	1,1	1,15
38	60	44041,3	3119,44	312,69	31902,2	1,09	1,15
39	75	44041,3	4068,17	394,93	40257,1	1,1	1,16
40	90	44041,3	4047,18	389,53	39717,5	1,1	1,16
41	105	44041,3	3255,17	321,6	32727,2	1,1	1,16
42	120	44041,3	3686,32	313,54	32048,5	1,12	1,18
43	135	44041,3	3920,35	295,88	30250,2	1,15	1,21
44	150	44041,3	3509,38	244,25	24846,1	1,17	1,23
45	165	44041,3	3032,47	207,06	21120,1	1,17	1,23
46	180	44041,3	3612,61	233,71	24968,4	1,17	1,23
47	195	44041,3	3532	217,51	22943	1,18	1,24
48	210	44041,3	2881,82	205,91	20976,1	1,15	1,21
49	225	44041,3	2720,68	231,15	23847,6	1,11	1,17
50	240	44041,3	2701,86	249,85	25863,8	1,1	1,15
51	255	44041,3	3276,72	288,91	29909,3	1,1	1,16
52	270	44041,3	4551,46	374,38	38860,1	1,12	1,18
53	285	44041,3	4931,25	385,47	40002,4	1,13	1,19
54	300	44041,3	4476,47	340,12	34995,4	1,13	1,19
55	315	44041,3	4562,69	313,74	32621,6	1,16	1,22
56	330	44041,3	4211,18	262,12	28296,6	1,17	1,23
57	345	44041,3	3467,05	192,78	22270,8	1,18	1,25

Quadro B9 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	44041,3	3223,23	188,96	20812,8	1,18	1,25
59	15	44041,3	2506,02	206,11	22509,9	1,11	1,17
60	30	44041,3	3918,46	350,23	36443,6	1,1	1,16
61	45	44041,3	4868,06	460,14	47409,8	1,1	1,15
62	60	44041,3	5326,01	521,15	53170,4	1,09	1,15
63	75	44041,3	6932	658,22	67095,1	1,1	1,16
64	90	44041,3	6911,46	649,22	66195,8	1,1	1,16
65	105	44041,3	5594,55	535,99	54545,3	1,1	1,16
66	120	44041,3	6304,72	522,56	53414,2	1,12	1,18
67	135	44041,3	6675,39	493,13	50417	1,15	1,21
68	150	44041,3	5961,42	407,09	41410,1	1,17	1,23
69	165	44041,3	5129,88	345,1	35200,2	1,17	1,23
70	180	44041,3	6054,92	389,51	41614	1,17	1,23
71	195	44041,3	5876,41	362,52	38238,3	1,18	1,24
72	210	44041,3	4749,32	343,18	34960,2	1,15	1,21
73	225	44041,3	4440,94	385,24	39746,1	1,11	1,17
74	240	44041,3	4376,15	416,41	43106,3	1,09	1,15
75	255	44041,3	5309,48	481,51	49848,8	1,1	1,16
76	270	44041,3	7419,6	623,97	64766,8	1,11	1,17
77	285	44041,3	8049,47	642,45	66670,7	1,12	1,18
78	300	44041,3	7299,93	566,86	58325,7	1,13	1,19
79	315	44041,3	7463,01	522,9	54369,3	1,15	1,21
80	330	44041,3	6906,19	436,87	47161,1	1,17	1,23
81	345	44041,3	5702,65	321,3	37118	1,18	1,24

Quadro B9 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	44041,3	1989,99	113,38	12487,7	1,19	1,25
86	15	44041,3	1461,92	123,66	13505,9	1,11	1,17
87	30	44041,3	2214,48	210,14	21866,2	1,1	1,16
88	45	44041,3	2698,65	276,09	28445,9	1,1	1,15
89	60	44041,3	2902,97	312,69	31902,2	1,09	1,15
90	75	44041,3	3816,05	394,93	40257,1	1,1	1,16
91	90	44041,3	3776,6	389,53	39717,5	1,1	1,16
92	105	44041,3	2984,57	321,6	32727,2	1,1	1,16
93	120	44041,3	3434,14	313,54	32048,5	1,12	1,18
94	135	44041,3	3703,77	295,88	30250,2	1,15	1,21
95	150	44041,3	3343,17	244,25	24846,1	1,17	1,23
96	165	44041,3	2927,95	207,06	21120,1	1,17	1,23
97	180	44041,3	3576,9	233,71	24968,4	1,17	1,23
98	195	44041,3	3567,54	217,51	22943	1,18	1,25
99	210	44041,3	2986,19	205,91	20976,1	1,16	1,22
100	225	44041,3	2886,75	231,15	23847,6	1,12	1,18
101	240	44041,3	2918,33	249,85	25863,8	1,11	1,17
102	255	44041,3	3528,84	288,91	29909,3	1,12	1,18
103	270	44041,3	4822,04	374,38	38860,1	1,13	1,19
104	285	44041,3	5201,85	385,47	40002,4	1,14	1,2
105	300	44041,3	4728,66	340,12	34995,4	1,15	1,21
106	315	44041,3	4779,27	313,74	32621,6	1,17	1,23
107	330	44041,3	4377,4	262,12	28296,6	1,18	1,25
108	345	44041,3	3571,57	192,78	22270,8	1,19	1,26

Quadro B9 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- vigas e lajes (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	44041,3	3256,88	188,96	20812,8	1,19	1,25
110	15	44041,3	2481,68	206,11	22509,9	1,11	1,17
111	30	44041,3	3837,78	350,23	36443,6	1,1	1,16
112	45	44041,3	4736,54	460,14	47409,8	1,1	1,15
113	60	44041,3	5152,63	521,15	53170,4	1,09	1,15
114	75	44041,3	6728,55	658,22	67095,1	1,1	1,16
115	90	44041,3	6691,82	649,22	66195,8	1,1	1,16
116	105	44041,3	5373,69	535,99	54545,3	1,1	1,16
117	120	44041,3	6097,69	522,56	53414,2	1,12	1,18
118	135	44041,3	6496,29	493,13	50417	1,15	1,21
119	150	44041,3	5822,46	407,09	41410,1	1,17	1,23
120	165	44041,3	5040,53	345,1	35200,2	1,17	1,23
121	180	44041,3	6021,27	389,51	41614	1,17	1,23
122	195	44041,3	5900,76	362,52	38238,3	1,18	1,24
123	210	44041,3	4830	343,18	34960,2	1,15	1,21
124	225	44041,3	4572,46	385,24	39746,1	1,11	1,17
125	240	44041,3	4549,54	416,41	43106,3	1,1	1,16
126	255	44041,3	5512,93	481,51	49848,8	1,11	1,16
127	270	44041,3	7639,24	623,97	64766,8	1,12	1,18
128	285	44041,3	8270,33	642,45	66670,7	1,13	1,19
129	300	44041,3	7506,97	566,86	58325,7	1,14	1,2
130	315	44041,3	7642,12	522,9	54369,3	1,16	1,22
131	330	44041,3	7045,15	436,87	47161,1	1,17	1,23
132	345	44041,3	5792	321,3	37118	1,19	1,25

Quadro B10 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- vigas e lajes (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	44031,2	1958,77	113,38	12487,7	1,19	1,25
35	15	44031,2	1500,34	123,66	13505,9	1,11	1,17
36	30	44031,2	2318,62	210,14	21866,2	1,1	1,16
37	45	44031,2	2860,53	276,09	28445,9	1,1	1,15
38	60	44031,2	3111,05	312,69	31902,2	1,09	1,15
39	75	44031,2	4054,25	394,93	40257,1	1,1	1,15
40	90	44031,2	4030,87	389,53	39717,5	1,1	1,16
41	105	44031,2	3237,79	321,6	32727,2	1,1	1,15
42	120	44031,2	3669,68	313,54	32048,5	1,12	1,18
43	135	44031,2	3907,13	295,88	30250,2	1,15	1,21
44	150	44031,2	3501,55	244,25	24846,1	1,17	1,23
45	165	44031,2	3027,99	207,06	21120,1	1,17	1,23
46	180	44031,2	3606,24	233,71	24968,4	1,17	1,23
47	195	44031,2	3527,71	217,51	22943	1,18	1,24
48	210	44031,2	2875,81	205,91	20976,1	1,15	1,21
49	225	44031,2	2706,82	231,15	23847,6	1,11	1,17
50	240	44031,2	2680,66	249,85	25863,8	1,09	1,15
51	255	44031,2	3250,62	288,91	29909,3	1,1	1,16
52	270	44031,2	4526,45	374,38	38860,1	1,12	1,17
53	285	44031,2	4910,8	385,47	40002,4	1,13	1,19
54	300	44031,2	4461,81	340,12	34995,4	1,13	1,19
55	315	44031,2	4555,18	313,74	32621,6	1,16	1,22
56	330	44031,2	4209,31	262,12	28296,6	1,17	1,23
57	345	44031,2	3468,76	192,78	22270,8	1,18	1,25

Quadro B10 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	44031,2	3227,08	188,96	20812,8	1,18	1,25
59	15	44031,2	2506,93	206,11	22509,9	1,11	1,17
60	30	44031,2	3914,22	350,23	36443,6	1,1	1,16
61	45	44031,2	4857,48	460,14	47409,8	1,1	1,15
62	60	44031,2	5308,96	521,15	53170,4	1,09	1,15
63	75	44031,2	6906,47	658,22	67095,1	1,1	1,15
64	90	44031,2	6882,84	649,22	66195,8	1,1	1,16
65	105	44031,2	5565,13	535,99	54545,3	1,1	1,15
66	120	44031,2	6277,55	522,56	53414,2	1,12	1,18
67	135	44031,2	6654,9	493,13	50417	1,15	1,21
68	150	44031,2	5950,79	407,09	41410,1	1,17	1,23
69	165	44031,2	5125,54	345,1	35200,2	1,17	1,23
70	180	44031,2	6047,94	389,51	41614	1,17	1,23
71	195	44031,2	5873,14	362,52	38238,3	1,18	1,24
72	210	44031,2	4743,16	343,18	34960,2	1,15	1,21
73	225	44031,2	4421,43	385,24	39746,1	1,11	1,16
74	240	44031,2	4343,88	416,41	43106,3	1,09	1,15
75	255	44031,2	5268,3	481,51	49848,8	1,1	1,16
76	270	44031,2	7379,37	623,97	64766,8	1,11	1,17
77	285	44031,2	8015,84	642,45	66670,7	1,12	1,18
78	300	44031,2	7274,92	566,86	58325,7	1,13	1,19
79	315	44031,2	7448,96	522,9	54369,3	1,15	1,21
80	330	44031,2	6900,65	436,87	47161,1	1,17	1,23
81	345	44031,2	5702,37	321,3	37118	1,18	1,24

Quadro B10 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- vigas e lajes (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	44031,2	1995,67	113,38	12487,7	1,19	1,26
86	15	44031,2	1466,74	123,66	13505,9	1,11	1,17
87	30	44031,2	2216,82	210,14	21866,2	1,1	1,16
88	45	44031,2	2697,45	276,09	28445,9	1,1	1,15
89	60	44031,2	2897,82	312,69	31902,2	1,09	1,15
90	75	44031,2	3805,39	394,93	40257,1	1,1	1,15
91	90	44031,2	3763,35	389,53	39717,5	1,1	1,16
92	105	44031,2	2969,83	321,6	32727,2	1,1	1,15
93	120	44031,2	3419,54	313,54	32048,5	1,12	1,18
94	135	44031,2	3691,87	295,88	30250,2	1,15	1,21
95	150	44031,2	3335,83	244,25	24846,1	1,17	1,23
96	165	44031,2	2923,1	207,06	21120,1	1,17	1,23
97	180	44031,2	3569,34	233,71	24968,4	1,17	1,23
98	195	44031,2	3561,3	217,51	22943	1,18	1,25
99	210	44031,2	2977,61	205,91	20976,1	1,16	1,22
100	225	44031,2	2869,89	231,15	23847,6	1,12	1,18
101	240	44031,2	2893,89	249,85	25863,8	1,11	1,17
102	255	44031,2	3499,47	288,91	29909,3	1,12	1,17
103	270	44031,2	4793,98	374,38	38860,1	1,13	1,19
104	285	44031,2	5178,76	385,47	40002,4	1,14	1,2
105	300	44031,2	4711,94	340,12	34995,4	1,15	1,21
106	315	44031,2	4770,45	313,74	32621,6	1,17	1,23
107	330	44031,2	4375,03	262,12	28296,6	1,18	1,24
108	345	44031,2	3573,65	192,78	22270,8	1,19	1,26

Quadro B10 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- vigas e lajes (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	44031,2	3261,9	188,96	20812,8	1,19	1,25
110	15	44031,2	2484,43	206,11	22509,9	1,11	1,17
111	30	44031,2	3835,93	350,23	36443,6	1,1	1,16
112	45	44031,2	4728,74	460,14	47409,8	1,1	1,15
113	60	44031,2	5138,55	521,15	53170,4	1,09	1,15
114	75	44031,2	6706	658,22	67095,1	1,1	1,15
115	90	44031,2	6665,96	649,22	66195,8	1,1	1,16
116	105	44031,2	5346,64	535,99	54545,3	1,1	1,15
117	120	44031,2	6072,32	522,56	53414,2	1,12	1,18
118	135	44031,2	6476,93	493,13	50417	1,15	1,21
119	150	44031,2	5812,2	407,09	41410,1	1,17	1,23
120	165	44031,2	5035,78	345,1	35200,2	1,17	1,23
121	180	44031,2	6013,12	389,51	41614	1,17	1,23
122	195	44031,2	5895,64	362,52	38238,3	1,18	1,24
123	210	44031,2	4821,45	343,18	34960,2	1,15	1,21
124	225	44031,2	4550,17	385,24	39746,1	1,11	1,17
125	240	44031,2	4514,29	416,41	43106,3	1,1	1,15
126	255	44031,2	5468,78	481,51	49848,8	1,1	1,16
127	270	44031,2	7596,25	623,97	64766,8	1,12	1,18
128	285	44031,2	8234,34	642,45	66670,7	1,13	1,19
129	300	44031,2	7480,15	566,86	58325,7	1,14	1,2
130	315	44031,2	7626,93	522,9	54369,3	1,16	1,22
131	330	44031,2	7039,24	436,87	47161,1	1,17	1,23
132	345	44031,2	5792,14	321,3	37118	1,19	1,25

Quadro B11 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- pilares e fundações (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	39202,4	1763,45	113,38	12487,7	1,16	1,22
35	15	39202,4	1353,25	123,66	13505,9	1,09	1,15
36	30	39202,4	2105,35	210,14	21866,2	1,09	1,14
37	45	39202,4	2600,27	276,09	28445,9	1,08	1,14
38	60	39202,4	2827,47	312,69	31902,2	1,08	1,13
39	75	39202,4	3677,65	394,93	40257,1	1,08	1,14
40	90	39202,4	3658,93	389,53	39717,5	1,08	1,14
41	105	39202,4	2942,61	321,6	32727,2	1,08	1,14
42	120	39202,4	3361,26	313,54	32048,5	1,1	1,16
43	135	39202,4	3601,16	295,88	30250,2	1,13	1,18
44	150	39202,4	3241,73	244,25	24846,1	1,14	1,21
45	165	39202,4	2793,43	207,06	21120,1	1,15	1,21
46	180	39202,4	3328,47	233,71	24968,4	1,15	1,21
47	195	39202,4	3275,4	217,51	22943	1,16	1,22
48	210	39202,4	2632,3	205,91	20976,1	1,13	1,19
49	225	39202,4	2390,7	231,15	23847,6	1,09	1,15
50	240	39202,4	2309,61	249,85	25863,8	1,07	1,13
51	255	39202,4	2809,18	288,91	29909,3	1,08	1,14
52	270	39202,4	3986,09	374,38	38860,1	1,09	1,15
53	285	39202,4	4359,37	385,47	40002,4	1,1	1,16
54	300	39202,4	3971,35	340,12	34995,4	1,11	1,17
55	315	39202,4	4084,15	313,74	32621,6	1,13	1,19
56	330	39202,4	3790,99	262,12	28296,6	1,15	1,21
57	345	39202,4	3136,7	192,78	22270,8	1,16	1,22

Quadro B11 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	39202,4	2921,03	188,96	20812,8	1,16	1,22
59	15	39202,4	2262,77	206,11	22509,9	1,09	1,15
60	30	39202,4	3541,18	350,23	36443,6	1,09	1,14
61	45	39202,4	4388,75	460,14	47409,8	1,08	1,14
62	60	39202,4	4786,37	521,15	53170,4	1,08	1,13
63	75	39202,4	6217,26	658,22	67095,1	1,08	1,14
64	90	39202,4	6194,01	649,22	66195,8	1,08	1,14
65	105	39202,4	5001,55	535,99	54545,3	1,08	1,14
66	120	39202,4	5694,09	522,56	53414,2	1,1	1,16
67	135	39202,4	6082,44	493,13	50417	1,13	1,18
68	150	39202,4	5466,41	407,09	41410,1	1,14	1,21
69	165	39202,4	4697,95	345,1	35200,2	1,15	1,21
70	180	39202,4	5565,5	389,51	41614	1,14	1,21
71	195	39202,4	5451,64	362,52	38238,3	1,16	1,22
72	210	39202,4	4354,91	343,18	34960,2	1,13	1,19
73	225	39202,4	3929,54	385,24	39746,1	1,09	1,14
74	240	39202,4	3775,42	416,41	43106,3	1,07	1,13
75	255	39202,4	4594,11	481,51	49848,8	1,08	1,13
76	270	39202,4	6547,7	623,97	64766,8	1,09	1,15
77	285	39202,4	7168,43	642,45	66670,7	1,1	1,16
78	300	39202,4	6526,94	566,86	58325,7	1,11	1,17
79	315	39202,4	6726,42	522,9	54369,3	1,13	1,19
80	330	39202,4	6254,8	436,87	47161,1	1,14	1,2
81	345	39202,4	5185,6	321,3	37118	1,16	1,22

Quadro B11 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	39202,4	1787,3	113,38	12487,7	1,16	1,22
86	15	39202,4	1331,77	123,66	13505,9	1,09	1,15
87	30	39202,4	2040,01	210,14	21866,2	1,09	1,14
88	45	39202,4	2495,51	276,09	28445,9	1,08	1,14
89	60	39202,4	2690,44	312,69	31902,2	1,08	1,13
90	75	39202,4	3517,68	394,93	40257,1	1,08	1,14
91	90	39202,4	3486,94	389,53	39717,5	1,08	1,14
92	105	39202,4	2770,3	321,6	32727,2	1,08	1,14
93	120	39202,4	3200,38	313,54	32048,5	1,1	1,16
94	135	39202,4	3462,68	295,88	30250,2	1,13	1,18
95	150	39202,4	3135,07	244,25	24846,1	1,14	1,21
96	165	39202,4	2725,87	207,06	21120,1	1,15	1,21
97	180	39202,4	3304,62	233,71	24968,4	1,15	1,21
98	195	39202,4	3296,87	217,51	22943	1,16	1,22
99	210	39202,4	2697,65	205,91	20976,1	1,14	1,2
100	225	39202,4	2495,45	231,15	23847,6	1,1	1,15
101	240	39202,4	2446,64	249,85	25863,8	1,08	1,14
102	255	39202,4	2969,14	288,91	29909,3	1,09	1,14
103	270	39202,4	4158,09	374,38	38860,1	1,1	1,16
104	285	39202,4	4531,68	385,47	40002,4	1,11	1,17
105	300	39202,4	4132,23	340,12	34995,4	1,12	1,18
106	315	39202,4	4222,63	313,74	32621,6	1,14	1,2
107	330	39202,4	3897,65	262,12	28296,6	1,15	1,21
108	345	39202,4	3204,25	192,78	22270,8	1,16	1,22

Quadro B11 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 1- pilares e fundações (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	39202,4	2943,72	188,96	20812,8	1,16	1,22
110	15	39202,4	2245,4	206,11	22509,9	1,09	1,15
111	30	39202,4	3484,93	350,23	36443,6	1,09	1,14
112	45	39202,4	4297,45	460,14	47409,8	1,08	1,14
113	60	39202,4	4666,26	521,15	53170,4	1,08	1,13
114	75	39202,4	6076,51	658,22	67095,1	1,08	1,14
115	90	39202,4	6042,21	649,22	66195,8	1,08	1,14
116	105	39202,4	4849,04	535,99	54545,3	1,08	1,14
117	120	39202,4	5551,28	522,56	53414,2	1,1	1,16
118	135	39202,4	5959,05	493,13	50417	1,13	1,18
119	150	39202,4	5370,85	407,09	41410,1	1,14	1,21
120	165	39202,4	4636,74	345,1	35200,2	1,15	1,21
121	180	39202,4	5542,81	389,51	41614	1,15	1,21
122	195	39202,4	5469,01	362,52	38238,3	1,16	1,22
123	210	39202,4	4411,16	343,18	34960,2	1,13	1,19
124	225	39202,4	4020,83	385,24	39746,1	1,09	1,15
125	240	39202,4	3895,54	416,41	43106,3	1,07	1,13
126	255	39202,4	4734,87	481,51	49848,8	1,08	1,14
127	270	39202,4	6699,5	623,97	64766,8	1,09	1,15
128	285	39202,4	7320,93	642,45	66670,7	1,1	1,16
129	300	39202,4	6669,75	566,86	58325,7	1,11	1,17
130	315	39202,4	6849,8	522,9	54369,3	1,13	1,19
131	330	39202,4	6350,35	436,87	47161,1	1,15	1,21
132	345	39202,4	5246,81	321,3	37118	1,16	1,22

Quadro B12 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- pilares e fundações (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	43911,5	2808,16	208,7	21166,6	1,14	1,2
35	15	43911,5	2467,43	221,17	22078,2	1,11	1,17
36	30	43911,5	3062,74	328,78	30165,8	1,1	1,15
37	45	43911,5	3493,44	416,51	37272,7	1,08	1,14
38	60	43911,5	3671,48	465,48	41168,4	1,08	1,13
39	75	43911,5	4177,5	549,65	46471,5	1,08	1,14
40	90	43911,5	4189,31	538,37	45308,7	1,08	1,14
41	105	43911,5	4265,51	487,91	43652,7	1,09	1,15
42	120	43911,5	4845,14	486	44124,7	1,11	1,17
43	135	43911,5	5103,11	462,73	42240,6	1,13	1,19
44	150	43911,5	4731,1	394,13	36564,7	1,14	1,2
45	165	43911,5	4008,12	329,77	30401,7	1,15	1,21
46	180	43911,5	3718,29	329,05	28636,7	1,14	1,2
47	195	43911,5	3638,5	315,03	27748	1,14	1,2
48	210	43911,5	3513,58	324,57	29676,9	1,12	1,18
49	225	43911,5	3570,01	371,57	34515,7	1,09	1,15
50	240	43911,5	3594,44	402,64	37509,9	1,08	1,14
51	255	43911,5	3878,82	443,63	40220,3	1,08	1,14
52	270	43911,5	4585,17	523,22	44724,3	1,09	1,15
53	285	43911,5	5284,23	551,78	47936,4	1,11	1,16
54	300	43911,5	5403,89	512,57	45864,9	1,12	1,18
55	315	43911,5	5552,87	480,59	43604,3	1,13	1,19
56	330	43911,5	5140,17	412	38469,7	1,14	1,2
57	345	43911,5	4201,73	315,48	30831,3	1,15	1,21

Quadro B12 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	43911,5	4661,95	347,83	35277,7	1,14	1,2
59	15	43911,5	4135,97	368,62	36797	1,11	1,17
60	30	43911,5	5168,47	547,97	50276,3	1,1	1,15
61	45	43911,5	5922,24	694,18	62121,2	1,08	1,14
62	60	43911,5	6248,12	775,8	68614	1,08	1,13
63	75	43911,5	7111,84	916,08	77452,5	1,08	1,14
64	90	43911,5	7141,71	897,28	75514,5	1,08	1,14
65	105	43911,5	7268,01	813,18	72754,4	1,09	1,15
66	120	43911,5	8222,55	810	73541,1	1,11	1,17
67	135	43911,5	8630,93	771,21	70401	1,13	1,19
68	150	43911,5	7980,8	656,88	60941,1	1,14	1,2
69	165	43911,5	6739,19	549,61	50669,5	1,15	1,21
70	180	43911,5	6215,47	548,41	47727,8	1,14	1,2
71	195	43911,5	6040,58	525,05	46246,6	1,14	1,2
72	210	43911,5	5792,07	540,94	49461,5	1,12	1,18
73	225	43911,5	5850,17	619,29	57526,2	1,09	1,15
74	240	43911,5	5861,74	671,07	62516,4	1,08	1,14
75	255	43911,5	6315,36	739,39	67033,9	1,08	1,14
76	270	43911,5	7482,43	872,04	74540,5	1,09	1,15
77	285	43911,5	8648,22	919,63	79894	1,1	1,16
78	300	43911,5	8859,17	854,29	76441,4	1,11	1,17
79	315	43911,5	9129,03	800,98	72673,8	1,13	1,19
80	330	43911,5	8471,32	686,66	64116,2	1,14	1,2
81	345	43911,5	6943,9	525,8	51385,4	1,15	1,21

Quadro B12 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	43911,5	2856,13	208,7	21166,6	1,15	1,21
86	15	43911,5	2443,32	221,17	22078,2	1,11	1,17
87	30	43911,5	2968,19	328,78	30165,8	1,1	1,15
88	45	43911,5	3334,89	416,51	37272,7	1,08	1,14
89	60	43911,5	3459,74	465,48	41168,4	1,08	1,13
90	75	43911,5	3926,99	549,65	46471,5	1,08	1,14
91	90	43911,5	3917,12	538,37	45308,7	1,08	1,14
92	105	43911,5	3990,17	487,91	43652,7	1,09	1,15
93	120	43911,5	4585,43	486	44124,7	1,11	1,17
94	135	43911,5	4876,72	462,73	42240,6	1,13	1,19
95	150	43911,5	4553,46	394,13	36564,7	1,14	1,2
96	165	43911,5	3891,33	329,77	30401,7	1,15	1,21
97	180	43911,5	3670,32	329,05	28636,7	1,14	1,2
98	195	43911,5	3662,61	315,03	27748	1,14	1,2
99	210	43911,5	3608,13	324,57	29676,9	1,12	1,18
100	225	43911,5	3728,56	371,57	34515,7	1,1	1,16
101	240	43911,5	3806,18	402,64	37509,9	1,09	1,15
102	255	43911,5	4129,32	443,63	40220,3	1,09	1,15
103	270	43911,5	4857,36	523,22	44724,3	1,1	1,16
104	285	43911,5	5559,56	551,78	47936,4	1,11	1,17
105	300	43911,5	5663,6	512,57	45864,9	1,13	1,19
106	315	43911,5	5779,26	480,59	43604,3	1,14	1,2
107	330	43911,5	5317,81	412	38469,7	1,15	1,21
108	345	43911,5	4318,52	315,48	30831,3	1,16	1,22

Quadro B12 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 2- pilares e fundações (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	43911,5	4706,75	347,83	35277,7	1,14	1,2
110	15	43911,5	4121,86	368,62	36797	1,11	1,17
111	30	43911,5	5096,41	547,97	50276,3	1,1	1,15
112	45	43911,5	5797,14	694,18	62121,2	1,08	1,14
113	60	43911,5	6078,51	775,8	68614	1,08	1,13
114	75	43911,5	6909,27	916,08	77452,5	1,08	1,14
115	90	43911,5	6919,99	897,28	75514,5	1,08	1,14
116	105	43911,5	7042,25	813,18	72754,4	1,09	1,15
117	120	43911,5	8008,14	810	73541,1	1,11	1,17
118	135	43911,5	8442,47	771,21	70401	1,13	1,19
119	150	43911,5	7831,14	656,88	60941,1	1,14	1,2
120	165	43911,5	6638,52	549,61	50669,5	1,15	1,21
121	180	43911,5	6170,66	548,41	47727,8	1,14	1,2
122	195	43911,5	6054,68	525,05	46246,6	1,14	1,2
123	210	43911,5	5864,12	540,94	49461,5	1,12	1,18
124	225	43911,5	5975,27	619,29	57526,2	1,09	1,15
125	240	43911,5	6031,35	671,07	62516,4	1,08	1,14
126	255	43911,5	6517,92	739,39	67033,9	1,08	1,14
127	270	43911,5	7704,14	872,04	74540,5	1,09	1,15
128	285	43911,5	8873,98	919,63	79894	1,11	1,16
129	300	43911,5	9073,58	854,29	76441,4	1,12	1,18
130	315	43911,5	9317,49	800,98	72673,8	1,14	1,19
131	330	43911,5	8620,98	686,66	64116,2	1,15	1,21
132	345	43911,5	7044,57	525,8	51385,4	1,15	1,21

Quadro B13 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- pilares e fundações (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	43839,9	1948,32	113,38	12487,7	1,19	1,25
35	15	43839,9	1490,47	123,66	13505,9	1,11	1,16
36	30	43839,9	2302,74	210,14	21866,2	1,1	1,16
37	45	43839,9	2838,48	276,09	28445,9	1,09	1,15
38	60	43839,9	3083,12	312,69	31902,2	1,09	1,15
39	75	43839,9	4014	394,93	40257,1	1,09	1,15
40	90	43839,9	3987,64	389,53	39717,5	1,1	1,15
41	105	43839,9	3196,05	321,6	32727,2	1,09	1,15
42	120	43839,9	3627,74	313,54	32048,5	1,12	1,18
43	135	43839,9	3872,99	295,88	30250,2	1,14	1,2
44	150	43839,9	3482,64	244,25	24846,1	1,17	1,23
45	165	43839,9	3019,62	207,06	21120,1	1,17	1,23
46	180	43839,9	3590,01	233,71	24968,4	1,17	1,23
47	195	43839,9	3515,81	217,51	22943	1,18	1,24
48	210	43839,9	2861,71	205,91	20976,1	1,15	1,21
49	225	43839,9	2670,67	231,15	23847,6	1,11	1,17
50	240	43839,9	2621,37	249,85	25863,8	1,09	1,15
51	255	43839,9	3171,72	288,91	29909,3	1,1	1,16
52	270	43839,9	4443,69	374,38	38860,1	1,11	1,17
53	285	43839,9	4835,91	385,47	40002,4	1,12	1,18
54	300	43839,9	4400,19	340,12	34995,4	1,13	1,19
55	315	43839,9	4508,23	313,74	32621,6	1,15	1,21
56	330	43839,9	4175,51	262,12	28296,6	1,17	1,23
57	345	43839,9	3445,57	192,78	22270,8	1,18	1,25

Quadro B13 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	43839,9	3211,2	188,96	20812,8	1,18	1,24
59	15	43839,9	2489,64	206,11	22509,9	1,11	1,16
60	30	43839,9	3884,56	350,23	36443,6	1,1	1,16
61	45	43839,9	4815,43	460,14	47409,8	1,09	1,15
62	60	43839,9	5255,34	521,15	53170,4	1,09	1,15
63	75	43839,9	6831,05	658,22	67095,1	1,09	1,15
64	90	43839,9	6801,75	649,22	66195,8	1,1	1,15
65	105	43839,9	5486,44	535,99	54545,3	1,09	1,15
66	120	43839,9	6199,05	522,56	53414,2	1,12	1,18
67	135	43839,9	6590,52	493,13	50417	1,14	1,2
68	150	43839,9	5913,42	407,09	41410,1	1,17	1,23
69	165	43839,9	5107,77	345,1	35200,2	1,17	1,23
70	180	43839,9	6019,35	389,51	41614	1,17	1,23
71	195	43839,9	5854,17	362,52	38238,3	1,18	1,24
72	210	43839,9	4722,87	343,18	34960,2	1,15	1,21
73	225	43839,9	4366,5	385,24	39746,1	1,1	1,16
74	240	43839,9	4252,14	416,41	43106,3	1,09	1,14
75	255	43839,9	5145,14	481,51	49848,8	1,09	1,15
76	270	43839,9	7250,47	623,97	64766,8	1,11	1,17
77	285	43839,9	7900,16	642,45	66670,7	1,12	1,18
78	300	43839,9	7180,82	566,86	58325,7	1,13	1,19
79	315	43839,9	7378,19	522,9	54369,3	1,15	1,21
80	330	43839,9	6850,16	436,87	47161,1	1,17	1,23
81	345	43839,9	5667,55	321,3	37118	1,18	1,24

Quadro B13 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	43839,9	1991,81	113,38	12487,7	1,19	1,25
86	15	43839,9	1461,8	123,66	13505,9	1,11	1,16
87	30	43839,9	2203,86	210,14	21866,2	1,1	1,16
88	45	43839,9	2676,12	276,09	28445,9	1,09	1,15
89	60	43839,9	2868,35	312,69	31902,2	1,09	1,15
90	75	43839,9	3761,45	394,93	40257,1	1,09	1,15
91	90	43839,9	3714,54	389,53	39717,5	1,1	1,15
92	105	43839,9	2920,99	321,6	32727,2	1,09	1,15
93	120	43839,9	3369,48	313,54	32048,5	1,12	1,18
94	135	43839,9	3649,12	295,88	30250,2	1,14	1,2
95	150	43839,9	3308,43	244,25	24846,1	1,17	1,23
96	165	43839,9	2906,93	207,06	21120,1	1,17	1,23
97	180	43839,9	3546,52	233,71	24968,4	1,17	1,23
98	195	43839,9	3544,49	217,51	22943	1,18	1,24
99	210	43839,9	2960,6	205,91	20976,1	1,16	1,22
100	225	43839,9	2833,03	231,15	23847,6	1,12	1,18
101	240	43839,9	2836,14	249,85	25863,8	1,1	1,16
102	255	43839,9	3424,26	288,91	29909,3	1,11	1,17
103	270	43839,9	4716,79	374,38	38860,1	1,12	1,18
104	285	43839,9	5110,97	385,47	40002,4	1,13	1,19
105	300	43839,9	4658,45	340,12	34995,4	1,14	1,2
106	315	43839,9	4732,1	313,74	32621,6	1,17	1,23
107	330	43839,9	4349,73	262,12	28296,6	1,18	1,24
108	345	43839,9	3558,26	192,78	22270,8	1,19	1,26

Quadro B13 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 3- pilares e fundações (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	43839,9	3252,54	188,96	20812,8	1,19	1,25
110	15	43839,9	2472,01	206,11	22509,9	1,11	1,16
111	30	43839,9	3809,16	350,23	36443,6	1,1	1,16
112	45	43839,9	4687,4	460,14	47409,8	1,09	1,15
113	60	43839,9	5083,41	521,15	53170,4	1,09	1,15
114	75	43839,9	6626,93	658,22	67095,1	1,09	1,15
115	90	43839,9	6579,35	649,22	66195,8	1,1	1,15
116	105	43839,9	5260,92	535,99	54545,3	1,09	1,15
117	120	43839,9	5985,79	522,56	53414,2	1,12	1,18
118	135	43839,9	6404,04	493,13	50417	1,14	1,2
119	150	43839,9	5766,43	407,09	41410,1	1,17	1,23
120	165	43839,9	5010,28	345,1	35200,2	1,17	1,23
121	180	43839,9	5978,01	389,51	41614	1,17	1,23
122	195	43839,9	5871,81	362,52	38238,3	1,18	1,24
123	210	43839,9	4798,27	343,18	34960,2	1,15	1,21
124	225	43839,9	4494,53	385,24	39746,1	1,11	1,17
125	240	43839,9	4424,07	416,41	43106,3	1,09	1,15
126	255	43839,9	5349,26	481,51	49848,8	1,1	1,16
127	270	43839,9	7472,87	623,97	64766,8	1,11	1,17
128	285	43839,9	8125,68	642,45	66670,7	1,12	1,18
129	300	43839,9	7394,09	566,86	58325,7	1,13	1,19
130	315	43839,9	7564,67	522,9	54369,3	1,15	1,22
131	330	43839,9	6997,16	436,87	47161,1	1,17	1,23
132	345	43839,9	5765,03	321,3	37118	1,18	1,25

Quadro B14 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- pilares e fundações (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	44041,3	1954,29	113,38	12487,7	1,19	1,25
35	15	44041,3	1497,46	123,66	13505,9	1,11	1,17
36	30	44041,3	2318,85	210,14	21866,2	1,1	1,16
37	45	44041,3	2864,72	276,09	28445,9	1,1	1,15
38	60	44041,3	3119,44	312,69	31902,2	1,09	1,15
39	75	44041,3	4068,17	394,93	40257,1	1,1	1,16
40	90	44041,3	4047,18	389,53	39717,5	1,1	1,16
41	105	44041,3	3255,17	321,6	32727,2	1,1	1,16
42	120	44041,3	3686,32	313,54	32048,5	1,12	1,18
43	135	44041,3	3920,35	295,88	30250,2	1,15	1,21
44	150	44041,3	3509,38	244,25	24846,1	1,17	1,23
45	165	44041,3	3032,47	207,06	21120,1	1,17	1,23
46	180	44041,3	3612,61	233,71	24968,4	1,17	1,23
47	195	44041,3	3532	217,51	22943	1,18	1,24
48	210	44041,3	2881,82	205,91	20976,1	1,15	1,21
49	225	44041,3	2720,68	231,15	23847,6	1,11	1,17
50	240	44041,3	2701,86	249,85	25863,8	1,1	1,15
51	255	44041,3	3276,72	288,91	29909,3	1,1	1,16
52	270	44041,3	4551,46	374,38	38860,1	1,12	1,18
53	285	44041,3	4931,25	385,47	40002,4	1,13	1,19
54	300	44041,3	4476,47	340,12	34995,4	1,13	1,19
55	315	44041,3	4562,69	313,74	32621,6	1,16	1,22
56	330	44041,3	4211,18	262,12	28296,6	1,17	1,23
57	345	44041,3	3467,05	192,78	22270,8	1,18	1,25

Quadro B14 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	44041,3	3223,23	188,96	20812,8	1,18	1,25
59	15	44041,3	2506,02	206,11	22509,9	1,11	1,17
60	30	44041,3	3918,46	350,23	36443,6	1,1	1,16
61	45	44041,3	4868,06	460,14	47409,8	1,1	1,15
62	60	44041,3	5326,01	521,15	53170,4	1,09	1,15
63	75	44041,3	6932	658,22	67095,1	1,1	1,16
64	90	44041,3	6911,46	649,22	66195,8	1,1	1,16
65	105	44041,3	5594,55	535,99	54545,3	1,1	1,16
66	120	44041,3	6304,72	522,56	53414,2	1,12	1,18
67	135	44041,3	6675,39	493,13	50417	1,15	1,21
68	150	44041,3	5961,42	407,09	41410,1	1,17	1,23
69	165	44041,3	5129,88	345,1	35200,2	1,17	1,23
70	180	44041,3	6054,92	389,51	41614	1,17	1,23
71	195	44041,3	5876,41	362,52	38238,3	1,18	1,24
72	210	44041,3	4749,32	343,18	34960,2	1,15	1,21
73	225	44041,3	4440,94	385,24	39746,1	1,11	1,17
74	240	44041,3	4376,15	416,41	43106,3	1,09	1,15
75	255	44041,3	5309,48	481,51	49848,8	1,1	1,16
76	270	44041,3	7419,6	623,97	64766,8	1,11	1,17
77	285	44041,3	8049,47	642,45	66670,7	1,12	1,18
78	300	44041,3	7299,93	566,86	58325,7	1,13	1,19
79	315	44041,3	7463,01	522,9	54369,3	1,15	1,21
80	330	44041,3	6906,19	436,87	47161,1	1,17	1,23
81	345	44041,3	5702,65	321,3	37118	1,18	1,24

Quadro B14 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	44041,3	1989,99	113,38	12487,7	1,19	1,25
86	15	44041,3	1461,92	123,66	13505,9	1,11	1,17
87	30	44041,3	2214,48	210,14	21866,2	1,1	1,16
88	45	44041,3	2698,65	276,09	28445,9	1,1	1,15
89	60	44041,3	2902,97	312,69	31902,2	1,09	1,15
90	75	44041,3	3816,05	394,93	40257,1	1,1	1,16
91	90	44041,3	3776,6	389,53	39717,5	1,1	1,16
92	105	44041,3	2984,57	321,6	32727,2	1,1	1,16
93	120	44041,3	3434,14	313,54	32048,5	1,12	1,18
94	135	44041,3	3703,77	295,88	30250,2	1,15	1,21
95	150	44041,3	3343,17	244,25	24846,1	1,17	1,23
96	165	44041,3	2927,95	207,06	21120,1	1,17	1,23
97	180	44041,3	3576,9	233,71	24968,4	1,17	1,23
98	195	44041,3	3567,54	217,51	22943	1,18	1,25
99	210	44041,3	2986,19	205,91	20976,1	1,16	1,22
100	225	44041,3	2886,75	231,15	23847,6	1,12	1,18
101	240	44041,3	2918,33	249,85	25863,8	1,11	1,17
102	255	44041,3	3528,84	288,91	29909,3	1,12	1,18
103	270	44041,3	4822,04	374,38	38860,1	1,13	1,19
104	285	44041,3	5201,85	385,47	40002,4	1,14	1,2
105	300	44041,3	4728,66	340,12	34995,4	1,15	1,21
106	315	44041,3	4779,27	313,74	32621,6	1,17	1,23
107	330	44041,3	4377,4	262,12	28296,6	1,18	1,25
108	345	44041,3	3571,57	192,78	22270,8	1,19	1,26

Quadro B14 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 4- pilares e fundações (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	44041,3	3256,88	188,96	20812,8	1,19	1,25
110	15	44041,3	2481,68	206,11	22509,9	1,11	1,17
111	30	44041,3	3837,78	350,23	36443,6	1,1	1,16
112	45	44041,3	4736,54	460,14	47409,8	1,1	1,15
113	60	44041,3	5152,63	521,15	53170,4	1,09	1,15
114	75	44041,3	6728,55	658,22	67095,1	1,1	1,16
115	90	44041,3	6691,82	649,22	66195,8	1,1	1,16
116	105	44041,3	5373,69	535,99	54545,3	1,1	1,16
117	120	44041,3	6097,69	522,56	53414,2	1,12	1,18
118	135	44041,3	6496,29	493,13	50417	1,15	1,21
119	150	44041,3	5822,46	407,09	41410,1	1,17	1,23
120	165	44041,3	5040,53	345,1	35200,2	1,17	1,23
121	180	44041,3	6021,27	389,51	41614	1,17	1,23
122	195	44041,3	5900,76	362,52	38238,3	1,18	1,24
123	210	44041,3	4830	343,18	34960,2	1,15	1,21
124	225	44041,3	4572,46	385,24	39746,1	1,11	1,17
125	240	44041,3	4549,54	416,41	43106,3	1,1	1,16
126	255	44041,3	5512,93	481,51	49848,8	1,11	1,16
127	270	44041,3	7639,24	623,97	64766,8	1,12	1,18
128	285	44041,3	8270,33	642,45	66670,7	1,13	1,19
129	300	44041,3	7506,97	566,86	58325,7	1,14	1,2
130	315	44041,3	7642,12	522,9	54369,3	1,16	1,22
131	330	44041,3	7045,15	436,87	47161,1	1,17	1,23
132	345	44041,3	5792	321,3	37118	1,19	1,25

Quadro B15 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- pilares e fundações (continua).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
34	0	44031,2	1958,77	113,38	12487,7	1,19	1,25
35	15	44031,2	1500,34	123,66	13505,9	1,11	1,17
36	30	44031,2	2318,62	210,14	21866,2	1,1	1,16
37	45	44031,2	2860,53	276,09	28445,9	1,1	1,15
38	60	44031,2	3111,05	312,69	31902,2	1,09	1,15
39	75	44031,2	4054,25	394,93	40257,1	1,1	1,15
40	90	44031,2	4030,87	389,53	39717,5	1,1	1,16
41	105	44031,2	3237,79	321,6	32727,2	1,1	1,15
42	120	44031,2	3669,68	313,54	32048,5	1,12	1,18
43	135	44031,2	3907,13	295,88	30250,2	1,15	1,21
44	150	44031,2	3501,55	244,25	24846,1	1,17	1,23
45	165	44031,2	3027,99	207,06	21120,1	1,17	1,23
46	180	44031,2	3606,24	233,71	24968,4	1,17	1,23
47	195	44031,2	3527,71	217,51	22943	1,18	1,24
48	210	44031,2	2875,81	205,91	20976,1	1,15	1,21
49	225	44031,2	2706,82	231,15	23847,6	1,11	1,17
50	240	44031,2	2680,66	249,85	25863,8	1,09	1,15
51	255	44031,2	3250,62	288,91	29909,3	1,1	1,16
52	270	44031,2	4526,45	374,38	38860,1	1,12	1,17
53	285	44031,2	4910,8	385,47	40002,4	1,13	1,19
54	300	44031,2	4461,81	340,12	34995,4	1,13	1,19
55	315	44031,2	4555,18	313,74	32621,6	1,16	1,22
56	330	44031,2	4209,31	262,12	28296,6	1,17	1,23
57	345	44031,2	3468,76	192,78	22270,8	1,18	1,25

Quadro B15 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
58	0	44031,2	3227,08	188,96	20812,8	1,18	1,25
59	15	44031,2	2506,93	206,11	22509,9	1,11	1,17
60	30	44031,2	3914,22	350,23	36443,6	1,1	1,16
61	45	44031,2	4857,48	460,14	47409,8	1,1	1,15
62	60	44031,2	5308,96	521,15	53170,4	1,09	1,15
63	75	44031,2	6906,47	658,22	67095,1	1,1	1,15
64	90	44031,2	6882,84	649,22	66195,8	1,1	1,16
65	105	44031,2	5565,13	535,99	54545,3	1,1	1,15
66	120	44031,2	6277,55	522,56	53414,2	1,12	1,18
67	135	44031,2	6654,9	493,13	50417	1,15	1,21
68	150	44031,2	5950,79	407,09	41410,1	1,17	1,23
69	165	44031,2	5125,54	345,1	35200,2	1,17	1,23
70	180	44031,2	6047,94	389,51	41614	1,17	1,23
71	195	44031,2	5873,14	362,52	38238,3	1,18	1,24
72	210	44031,2	4743,16	343,18	34960,2	1,15	1,21
73	225	44031,2	4421,43	385,24	39746,1	1,11	1,16
74	240	44031,2	4343,88	416,41	43106,3	1,09	1,15
75	255	44031,2	5268,3	481,51	49848,8	1,1	1,16
76	270	44031,2	7379,37	623,97	64766,8	1,11	1,17
77	285	44031,2	8015,84	642,45	66670,7	1,12	1,18
78	300	44031,2	7274,92	566,86	58325,7	1,13	1,19
79	315	44031,2	7448,96	522,9	54369,3	1,15	1,21
80	330	44031,2	6900,65	436,87	47161,1	1,17	1,23
81	345	44031,2	5702,37	321,3	37118	1,18	1,24

Quadro B15 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- pilares e fundações (continuação).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
85	0	44031,2	1995,67	113,38	12487,7	1,19	1,26
86	15	44031,2	1466,74	123,66	13505,9	1,11	1,17
87	30	44031,2	2216,82	210,14	21866,2	1,1	1,16
88	45	44031,2	2697,45	276,09	28445,9	1,1	1,15
89	60	44031,2	2897,82	312,69	31902,2	1,09	1,15
90	75	44031,2	3805,39	394,93	40257,1	1,1	1,15
91	90	44031,2	3763,35	389,53	39717,5	1,1	1,16
92	105	44031,2	2969,83	321,6	32727,2	1,1	1,15
93	120	44031,2	3419,54	313,54	32048,5	1,12	1,18
94	135	44031,2	3691,87	295,88	30250,2	1,15	1,21
95	150	44031,2	3335,83	244,25	24846,1	1,17	1,23
96	165	44031,2	2923,1	207,06	21120,1	1,17	1,23
97	180	44031,2	3569,34	233,71	24968,4	1,17	1,23
98	195	44031,2	3561,3	217,51	22943	1,18	1,25
99	210	44031,2	2977,61	205,91	20976,1	1,16	1,22
100	225	44031,2	2869,89	231,15	23847,6	1,12	1,18
101	240	44031,2	2893,89	249,85	25863,8	1,11	1,17
102	255	44031,2	3499,47	288,91	29909,3	1,12	1,17
103	270	44031,2	4793,98	374,38	38860,1	1,13	1,19
104	285	44031,2	5178,76	385,47	40002,4	1,14	1,2
105	300	44031,2	4711,94	340,12	34995,4	1,15	1,21
106	315	44031,2	4770,45	313,74	32621,6	1,17	1,23
107	330	44031,2	4375,03	262,12	28296,6	1,18	1,24
108	345	44031,2	3573,65	192,78	22270,8	1,19	1,26

Quadro B15 – Parâmetro de estabilidade (FAVt) para combinações de ELU Modelo 5- pilares e fundações (final).
Fonte: autor

Caso	Ang	CTot	M2	CHor	M1	MultH	FAVt
109	0	44031,2	3261,9	188,96	20812,8	1,19	1,25
110	15	44031,2	2484,43	206,11	22509,9	1,11	1,17
111	30	44031,2	3835,93	350,23	36443,6	1,1	1,16
112	45	44031,2	4728,74	460,14	47409,8	1,1	1,15
113	60	44031,2	5138,55	521,15	53170,4	1,09	1,15
114	75	44031,2	6706	658,22	67095,1	1,1	1,15
115	90	44031,2	6665,96	649,22	66195,8	1,1	1,16
116	105	44031,2	5346,64	535,99	54545,3	1,1	1,15
117	120	44031,2	6072,32	522,56	53414,2	1,12	1,18
118	135	44031,2	6476,93	493,13	50417	1,15	1,21
119	150	44031,2	5812,2	407,09	41410,1	1,17	1,23
120	165	44031,2	5035,78	345,1	35200,2	1,17	1,23
121	180	44031,2	6013,12	389,51	41614	1,17	1,23
122	195	44031,2	5895,64	362,52	38238,3	1,18	1,24
123	210	44031,2	4821,45	343,18	34960,2	1,15	1,21
124	225	44031,2	4550,17	385,24	39746,1	1,11	1,17
125	240	44031,2	4514,29	416,41	43106,3	1,1	1,15
126	255	44031,2	5468,78	481,51	49848,8	1,1	1,16
127	270	44031,2	7596,25	623,97	64766,8	1,12	1,18
128	285	44031,2	8234,34	642,45	66670,7	1,13	1,19
129	300	44031,2	7480,15	566,86	58325,7	1,14	1,2
130	315	44031,2	7626,93	522,9	54369,3	1,16	1,22
131	330	44031,2	7039,24	436,87	47161,1	1,17	1,23
132	345	44031,2	5792,14	321,3	37118	1,19	1,25

Quadro B16 – Deslocamentos máximos – Modelo 1.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc
5	0	4,9	13	120	8,9	21	240	8,3
6	15	4,9	14	135	8,9	22	255	13,1
7	30	6,5	15	150	6,9	23	270	12,2
8	45	8,2	16	165	5,1	24	285	10,9
9	60	9,7	17	180	6,6	25	300	9,3
10	75	10,5	18	195	9,4	26	315	9,6
11	90	9,8	19	210	6	27	330	9,1
12	105	8,3	20	225	4,8	28	345	8

Quadro B17 – Deslocamentos máximos – Modelo 2.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc
5	0	4,6	13	120	10,2	21	240	7,6
6	15	4	14	135	9,9	22	255	9,6
7	30	5,3	15	150	8,1	23	270	9,9
8	45	6,8	16	165	6	24	285	10,6
9	60	8,1	17	180	5,3	25	300	10,4
10	75	9,2	18	195	5,7	26	315	10,1
11	90	9,2	19	210	5,3	27	330	8,9
12	105	9,5	20	225	5,8	28	345	7,1

Quadro B18 – Deslocamentos máximos – Modelo 3.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc
5	0	5	13	120	8,7	21	240	8,2
6	15	4,7	14	135	8,5	22	255	12,5
7	30	6,2	15	150	6,4	23	270	11,7
8	45	7,9	16	165	5,2	24	285	10,6
9	60	9,5	17	180	6,1	25	300	9,1
10	75	10,2	18	195	8,6	26	315	9,6
11	90	9,5	19	210	5,5	27	330	9,1
12	105	8,1	20	225	5,1	28	345	8,1

Quadro B19 – Deslocamentos máximos – Modelo 4.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc
5	0	5	13	120	8,8	21	240	8,3
6	15	4,7	14	135	8,6	22	255	12,6
7	30	6,2	15	150	6,4	23	270	11,8
8	45	7,9	16	165	5,3	24	285	10,7
9	60	9,4	17	180	6,1	25	300	9,2
10	75	10,2	18	195	8,6	26	315	9,6
11	90	9,5	19	210	5,5	27	330	9,1
12	105	8,2	20	225	5,2	28	345	8,1

Quadro B20 – Deslocamentos máximos – Modelo 5.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc	Caso	Ang	DeslHc
5	0	5	13	120	8,8	21	240	8,3
6	15	4,7	14	135	8,5	22	255	12,6
7	30	6,2	15	150	6,4	23	270	11,8
8	45	7,9	16	165	5,3	24	285	10,7
9	60	9,4	17	180	6,1	25	300	9,2
10	75	10,2	18	195	8,6	26	315	9,6
11	90	9,5	19	210	5,5	27	330	9,1
12	105	8,2	20	225	5,1	28	345	8,1

Quadro B21 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 1.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp
5	0	0,1	13	120	0,1	21	240	0,3
6	15	0,1	14	135	0,1	22	255	0,4
7	30	0,2	15	150	0,1	23	270	0,2
8	45	0,2	16	165	0	24	285	0,1
9	60	0,2	17	180	0,2	25	300	0,2
10	75	0,2	18	195	0,4	26	315	0,1
11	90	0,1	19	210	0,2	27	330	0,1
12	105	0	20	225	0	28	345	0,1

Quadro B22 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 2.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp
5	0	0	13	120	0,4	21	240	0,1
6	15	0	14	135	0,1	22	255	0,1
7	30	0,1	15	150	0	23	270	0,1
8	45	0,1	16	165	0,2	24	285	0,1
9	60	0,1	17	180	0,1	25	300	0,4
10	75	0,1	18	195	0,1	26	315	0,2
11	90	0,1	19	210	0,1	27	330	0,1
12	105	0,2	20	225	0,2	28	345	0

Quadro B23 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 3.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp
5	0	0,1	13	120	0,1	21	240	0,2
6	15	0,1	14	135	0,1	22	255	0,3
7	30	0,1	15	150	0	23	270	0,2
8	45	0,2	16	165	0,1	24	285	0,1
9	60	0,2	17	180	0,1	25	300	0,2
10	75	0,1	18	195	0,2	26	315	0,1
11	90	0,1	19	210	0,2	27	330	0,1
12	105	0,1	20	225	0,1	28	345	0,1

Quadro B24 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 4.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp
5	0	0,1	13	120	0,1	21	240	0,2
6	15	0,1	14	135	0,1	22	255	0,3
7	30	0,1	15	150	0	23	270	0,2
8	45	0,2	16	165	0,1	24	285	0,1
9	60	0,2	17	180	0,1	25	300	0,2
10	75	0,1	18	195	0,3	26	315	0,1
11	90	0,1	19	210	0,2	27	330	0,1
12	105	0	20	225	0,1	28	345	0,1

Quadro B25 – Deslocamentos máximos entre pisos – Modelo 5.
Fonte: autor

Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp	Caso	Ang	DeslHp
5	0	0,1	13	120	0,1	21	240	0,2
6	15	0,1	14	135	0,1	22	255	0,3
7	30	0,1	15	150	0	23	270	0,2
8	45	0,2	16	165	0,1	24	285	0,1
9	60	0,2	17	180	0,1	25	300	0,2
10	75	0,1	18	195	0,3	26	315	0,1
11	90	0,1	19	210	0,2	27	330	0,1
12	105	0	20	225	0,1	28	345	0,1