UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DECLARAÇÃO

DANILO DO PRADO FERREIRA GOMES

COMPARAÇÃO DE CONSUMO DE AÇO ATRAVÉS DO CÁLCULO ESTRUTURAL DE GALPÃO INDUSTRIAL UTILIZANDO PERFIS LAMINADOS DE ABAS PARARELAS E PERFIS TUBULARES, SEGUNDO NBR 8800 E NBR 16239

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

Aprovado em: 11/06/2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ariovaldo Fernandes de Almeida – UFG (Orientador)

Prof. Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira – UFG

Prof. Ms. Ivo Carrijo Andrade Neto – UFG

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

Prof. Dr. Ariovaldo Fernandes de Almeida (orientador)

Em: 15/06/2021

OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES:

- **Todos os campos do presente documento são de preenchimento obrigatório, sendo os mesmos adequados a quantidade de examinadores;**
- **Após preenchido, o documento deve ser assinado por todos os examinadores e também pelo orientador do referido trabalho.**

Documento assinado eletronicamente por **Ariovaldo Fernandes De Almeida**, **Professor do Magistério Superior**, em 15/06/2021, às 10:16, 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 **2115901** e o código CRC **64ACE48D**.

Referência: Processo nº 23070.028707/2021-95 SEI nº 2115901

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

COMPARAÇÃO DE CONSUMO DE AÇO ATRAVÉS DO CÁLCULO ESTRUTURAL DE GALPÃO INDUSTRIAL UTILIZANDO PERFIS LAMINADOS DE ABAS PARALELAS E PERFIS TUBULARES, SEGUNDO NBR 8800 E NBR 16239.

DANILO DO PRADO FERREIRA GOMES

GOIÂNIA
2021

DANILO DO PRADO FERREIRA GOMES

COMPARAÇÃO DE CONSUMO DE AÇO ATRAVÉS DO CÁLCULO ESTRUTURAL DE GALPÃO INDUSTRIAL UTILIZANDO PERFIS LAMINADOS DE ABAS PARALELAS E PERFIS TUBULARES, SEGUNDO NBR 8800 E NBR 16239.

Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Ariovaldo Fernandes de Almeida

GOIÂNIA
2021

RESUMO

A grande variedade de perfis estruturais disponível no mercado torna a escolha dos elementos estruturais uma atividade de fundamental importância para que a solução estrutural escolhida se torne a mais otimizada possível e desempenhe conforme os parâmetros para a qual foi projetada. Dentre os diversos tipos de fabricação e conformação, as propriedades químicas e físicas do aço, a geometria e as especificidades da seção transversal dos perfis, é necessário que o projetista tenha o conhecimento de tais características para que no momento da concepção da solução estrutural, o projetista, faço uso do tipo correto e ideal do perfil para a concepção proposta. Nesse contexto a análise do consumo de aço é uma importante ferramenta na decisão de qual solução utilizar, haja vista que o consumo de aço é diretamente ligado ao custo da construção.

Neste trabalho é apresentado um estudo comparativo do consumo de aço de uma solução estrutural de galpão industrial em aço utilizando perfis laminados de abas paralelas e uma segunda solução utilizando perfis tubulares. O estudo baseia-se no cálculo estrutural utilizando-se metodologia apresentadas nas normas nacionais: NBR 8800 (Projeto e execução de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios) e NBR 16239 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares). A finalidade desse estudo é demonstrar a viabilidade das concepções estruturais utilizando perfis tubulares, bem como fomentar o estudo e análises dessas soluções e servir como alternativa nas concepções estruturais de galpões.

Palavras-chave: Estruturas em aço. galpões. Consumo de aço. perfis tubulares.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Seção transversal tubular circular e quadrada com seção H de mesma dimensão.....17

Figura 2.2 – Elementos componentes de um galpão em estrutura metálica.....26

Figura 2.3 – Tipos de ligações com perfis tubulares.....39

Figura 2.4 – Mecanismos de transferência de esforços.....40

Figura 2.5 – Ligações com afastamento e sobreposição.....41

Figura 2.6 – Ligação com chapa e cantoneira.....41

Figura 2.7 – Base rotulada e engastada, respectivamente.....43

Figura 2.8 – Ligação do Tipo 1.....44

Figura 2.9 – Ligação do Tipo 2 e 3.....44

Figura 3.1 – Corte longitudinal.....47

Figura 3.2 – Planta baixa.....47

Figura 3.3 – Coeficientes de pressão e forma, externos para paredes de edificação de planta regular.....50

Figura 3.4 – Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricas, em edificações de planta regular.....51

Figura 3.5 - Cpe Médio.....51

Figura 3.6 – Combinações dos coeficientes de pressão vento a 0°, cpi 0,20 e -0,30.....52

Figura 3.7 – Combinações dos coeficientes de pressão vento a 90°, cpi 0,20 e -0,30.....52

Figura 3.8 – Modelo de cálculo.....54

Figura 3.9 – Verificação de deslocamentos.....54

Figura 4.1 – Comparação de seções.....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes físicas do aço.....21

Tabela 2 – Aços especificados por normas brasileiras para fins estruturais.....22

Tabela 3 – Aços especificados segundo a ASTM.....23

Tabela 4 – Consumo por elemento de cada solução 55

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISC – American Institute of Steel Construction

ASTM – American Society for Testing and Materials

AWS – American Welding Society

LISTA DE SÍMBOLOS

fu – Resistência à ruptura do aço à tração

fy – Resistencia ao escoamento do aço

E – Módulo de elasticidade

G – Módulo de elasticidade transversal

υ – Coeficiente de Poisson

βa – Coeficiente de dilatação térmica

ρa – Massa específica

Nt,Sd – força axial de tração solicitante de cálculo

Nt,Rd – força axial de tração resistente de cálculo

Ag – Área bruta da seção transversal da barra

Ae – Área líquida da seção transversal da barra

Na - Área líquida da barra

Ct – Coeficiente de redução da área líquida

γ – coeficiente de ponderação da resistência ou ações

ec – Excentricidade da ligação

lc – Comprimento efetivo da ligação

lw – Comprimento dos cordões de solda

b – Largura da chapa

V0 – Velocidade básica do vento

Vk – Velocidade característica

q – pressão dinâmica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....13

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....13

1.2. JUSTIFICATIVA.....15

1.3. OBJETIVO GERAL.....15

1.4. OBJETIVO ESPECÍFICO.....16

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....16

2.1. VANTAGENS DA ESTRUTURA EM AÇO.....16

2.2. DESVANTAGENS DA ESTRUTURA EM AÇO.....18

2.3. PERFIS ESTRUTURAIS LAMINADOS E TUBULARES.....18

2.4. AÇOS ESTRUTURAIS.....19

2.5. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS QUE COMPOE UM GALPÃO.....24

2.6. CRITÉRIOS DE PROJETO.....26

2.6.1. Estados limites últimos.....27

2.6.2. Estados limites de serviço.....27

2.7. AÇÕES E SEGURANÇAS NAS ESTRUTURAS METÁLICAS.....27

2.7.1. Ações e solicitações.....28

2.7.1.1. Ações permanentes.....28

2.7.1.2. Ações variáveis.....28

2.7.1.3. Ações Excepcionais.....28

2.8. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA PARA ATENDIMENTO DOS ESTADOS LIMITES.....29

2.9. CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....30

2.9.1. Coeficiente de ponderação das ações.....30

2.9.2. Combinações das ações de cálculo.....30

2.10. FORÇAS DEVIDO AO VENTO (ABNT NBR 6123:1988) 33

2.10.1. Coeficientes de pressão.....33

2.11. CONDIÇÕES ESPECÍFICAS PARA DIMENSIONAMENTO.....33

2.11.1. Barras tracionadas.....33

2.11.2. Barras comprimidas.....33

2.11.2.1. Coeficiente de redução de área líquida.....35

2.11.2.2. Limites de esbeltez.....35

2.11.3. Barras Fletidas.....36

2.11.4. Barras sob esforços associados.....37

2.11.5. Particularidades da NBR 16239:2013.....37

2.12. LIGAÇÕES.....38

2.12.1. Ligações parafusadas.....39

2.12.2. Ligações soldadas.....40

2.12.3. Elementos de ligação.....41

2.12.3.1. Ligação Viga-pilar.....41

2.12.3.2. Ligação de base de pilares.....42

2.13. ANÁLISE ESTRUTURAL.....44

3. METODOLOGIA.....46

3.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO.....46

3.1.1. Características da edificação.....46

3.1.2. Arranjo estrutural.....46

3.2. DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS.....48

3.2.1. Ações permanentes.....48

3.2.2. Sobrecarga em cobertura.....48

3.2.3. Vento – NORMA ABNT NBR 6123:1988.....49

3.2.3.1. Dados do vento.....49

3.3. ANÁLISE COMPUTACIONAL.....52

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....55

4.1. CONSUMO DE AÇO.....55

4.2. COMPARAÇÃO DE SEÇÃO.....56

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....56

5.1. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS.....56

5.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....57

REFERÊNCIAS.....59

ANEXO A.....61

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A grande variedade de perfis e tipos de aço no mercado atual tem tornado a escolha do material uma atividade a parte à elaboração dos projetos em estrutura metálica. O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos diferentes tipos de perfis disponíveis é fundamental para aqueles profissionais que buscam a solução mais otimizada e que atenda todos os parâmetros de funcionamento da estrutura. Nesse contexto a análise comparativa do consumo de aço de diferentes perfis para uma mesma estrutura agrega bastante valor para os profissionais que buscam manter-se atualizados.

O consumo de aço na concepção de uma solução estrutural é um parâmetro indispensável na análise do custo da edificação, haja vista que o aço é, comumente, vendido por tonelada. Outros fatores, entretanto, são ignorados segundo BELLEI (1998) no projeto, detalhamento, fabricação e montagem de uma estrutura de aço, os seguintes fatores influenciam o custo de uma estrutura, sendo estes:

- Seleção do sistema estrutural;
- Projeto dos elementos estruturais individuais;
- Projeto e detalhe das ligações;
- Processo a ser utilizado na fabricação;
- Especificações para fabricação e montagem;
- Sistema de proteção à corrosão;
- Sistema a ser usado na montagem;
- Sistema de proteção contra incêndio.

Os galpões em estruturas metálicas do tipo uma ou duas águas, são encontrados com maior frequência atualmente na construção civil, são construções em aço geralmente de um único pavimento, constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos

regularmente espaçados, com cobertura superior apoiada em sistemas de terças e vigas ou tesouras e treliças, com grandes áreas cobertas e destinadas para uso comercial (lojas, estacionamentos, centros de distribuição, entre outros), uso industrial com pontes rolantes, agrícola ou outras aplicações.

Este modelo possibilita a construção do galpão metálico com grandes áreas de cobertura em um mesmo pavimento. E, portanto, é o modelo ideal para se fazer a análise comparativa de consumo de aço.

Os perfis de seção transversal circular e de seção quadrada são muitos usados também como colunas, devido aos excelentes raios de giração, e para compor elementos de banzos superiores e inferiores, diagonais e montantes de treliças de coberturas por possuírem um aspecto mais agradável e elegante. (NETO; CUNHA, 2017, p.53).

De acordo com Santos (2010) o uso de seções tubulares em treliças, devido ao seu alto desempenho, tem aumentado cada vez mais devido as seções tubulares possuírem um bom comportamento na resistência a compressão.

> O tubo empregado como barras de vigas treliçadas, onde os esforços de compressão e tração predominam no dimensionamento, encontra sua melhor condição de trabalho. Essas treliças são frequentemente empregadas em estruturas de grandes vãos, uma vez que, além de leves, propiciam um agradável aspecto de leveza na estrutura. A solução de treliças planas, devido a sua esbeltez, necessita de ter banzos comprimidos contidos lateralmente por meio de contraventamentos. Entretanto, essa contenção lateral pode ser mais espaçada nas obras com seções tubulares, em função do seu melhor comportamento à compressão. Essa redução de elementos de contenção simplifica os trabalhos de fabricação e montagem, uma vez que reduz o número de peças a serem utilizadas (ARAÚJO et al., 2016, p.31).

Conforme exposto por ARAÚJO et al (2016) um caso especial de seções tubulares é o dos tubos laminados a quente sem costura e resfriados ao ar livre. Esses tubos possuem baixo nível de tensão residual, que são tensões inerentes ao material e que independem de esforços externos ou gradiente de temperatura, o que aliado às suas vantagens geométricas torna os perfis tubulares excelentes elementos resistivos às solicitações de compressão na direção de melhoria do comportamento na flambagem local e global, e

essas características podem gerar redução de consumo de aço nas barras comprimidas de até 50% em peso.

1.2. JUSTIFICATIVA

A escolha de um determinado tipo de perfil não é tarefa simples e o profissional deverá ter em mente uma série de questões como sua adequação a determinado uso, considerações estéticas, suas propriedades mecânicas, dimensões das seções transversais, os custos do material e de sua fabricação, as formas de montagem e a manutenção. O trabalho atual surge do questionamento se há alguma otimização na economia de material quando se opta por diferentes tipos de perfis para a mesma solução estrutural. Esse estudo comparativo se justifica tendo em vista a grande parcela que a estrutura desempenha no custo de um empreendimento e na característica inerente ao Engenheiro Civil, que é a busca por soluções otimizadas e com custos compatíveis. Segundo Araújo et al. (2016), os perfis tubulares possuem propriedades geométricas que tornam possível a elaboração das mais variadas obras com soluções arrojadas e econômicas. Estes perfis, devido à geometria, possuem também grande resistência à torção e resistência equilibrada à flexão. Os perfis tubulares possibilitam ainda o enchimento com o concreto, não necessitando de formas e assim aumentando a resistência mecânica e resistência ao fogo. Os perfis tubulares possuem, na maioria das vezes, seções circulares, quadradas e retangulares. Sua fabricação pode ser laminada a quente ou dobrada a frio, com ou sem costura.

1.3. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho fará a análise comparativa do consumo de aço de uma estrutura em forma de sistema estrutural de pórtico com cobertura de duas águas, com sistema treliça trapezoidal na cobertura, sem previsão de instalação de ponte rolante, com vão principal de 20 metros, situado na cidade Goiânia - Goiás. Na primeira análise serão utilizados perfis estruturais de abas paralelas e na segunda análise, perfis tubulares. Serão utilizadas como embasamento normativo para verificação da estabilidade e segurança da estrutura as normas: NBR 8800 e NBR 16239.

1.4. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Determinar os carregamentos, ações e deslocamentos típicos para o tipo de construção selecionada, tendo como amparo as normas em vigência tanto nacionais e internacionais;

- Projetar um galpão com dimensões padrões de 20 metros de vão principal, por 30 metros de comprimento, tendo 5 pórticos espaçados de 6 metros entre si, sem previsão de ponte rolante, com estrutura de cobertura em treliça trapezoidal, em terreno plano e sem ondulações situado na cidade de Goiânia - Goiás

- Realizar uma análise comparativa do consumo de aço das soluções estruturais consideradas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica visa expor quais são as principais tipologias das construções industriais em aço, quais são os parâmetros para o pré-dimensionamento da solução estrutural adotada, quais ações deverão, por norma, ser analisadas para o dimensionamento da estrutura e quais são os principais aços estruturais, materiais utilizados em galpões industriais e suas características.

2.1 VANTAGENS DA ESTRUTURA EM AÇO

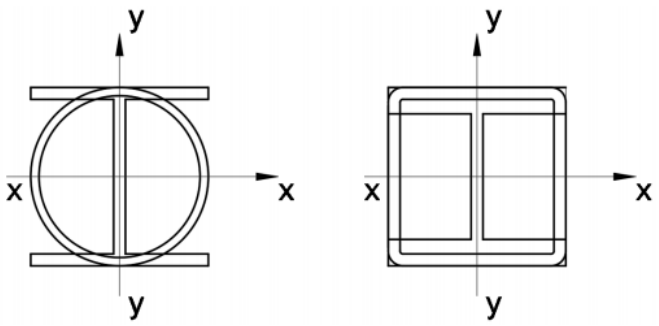
Assim como a maioria das soluções estruturais, as estruturas em aço possuem vantagens, segundo CHAMBERLAIN et al. (2013), sendo estas a redução das solicitações nas fundações, o aumento da área útil devido os grandes vãos possibilitados pelos sistemas estruturais em aço, a redução do tempo de montagem aliado a agilidade e flexibilidade na montagem, e também, o autor leva em conta um fator de grande importância que é a organização, racionalização de um canteiro de obras limpo, o que resultam em uma logística de montagem mais dinâmica o que resulta em economia de tempo e consequentemente financeira.

De acordo com Fakury et al. (2017) dentre as diversas vantagens da utilização do aço como material estrutural, seja em elementos mistos ou simplesmente de aço, pode-se citar a elevada resistência, elevada ductilidade, alto grau de confiança, canteiro de obras menor, mais limpo e organizado, facilidade de reforço e ampliação, reciclagem e reaproveitamento e rapidez na execução.

O uso adequado dos perfis tubulares, segundo Araújo et al. (2016) conduz a soluções leves e consequentemente, econômicas e competitivas. No caso de seções circulares homogêneas, quando comparados a perfis soldados compostos por chapas comerciais e mesma dimensão que os tubos e cuja massa sejam próximas, as seções circulares, devido a distribuição de sua massa em torno de seu eixo longitudinal confere iguais propriedades geométricas em qualquer eixo que passe pelo seu centro geométrico. No caso de barras comprimidas, os perfis tubulares de seção circular conduzem a iguais resistências em qualquer eixo devido a sua simetria, minimizando o problema da flambagem global.

Segundo Pfeil e Pfeil (2008) é importante tomar precauções para que não haja acúmulo de poeira ou água nos perfis para aumentar a vida útil dos elementos, no caso de perfis tubulares, o fato de serem perfis fechados contribui para o não acúmulo de sujeira, água e material pulverulento, aumento assim a vida útil e a diminuição de manutenção.

Figura 2.1 Seção transversal tubular circular e quadrada com seção H de mesma dimensão.



Fonte: (ARAÚJO, et all. 2016, adaptado).

Ademais, Bellei (1998), cita como vantagem a grande margem de segurança no trabalho, que se deve ao fato do material ser único e homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos.

> A estrutura de aço é, portanto, a mais adequada às obras em que há necessidade de vencer grandes vãos, como é o caso de ginásios de esporte, estádios, centros de compras, galpões, hangares, ou grandes alturas, como edifícios altos. Além disso, por causa do menor peso próprio da estrutura, o uso do aço é vantajoso quando as condições do solo são pouco favoráveis. (FAKURY et al. 2017, p4).

2.2 DESVANTAGENS DA ESTRUTURA EM AÇO

Os pontos negativos das estruturas metálicas, segundo Chamberlain et al. (2013), estão relacionados a falta de planejamento da obra que pode onerar o sistema tornando mais caro que uma estrutura de concreto equivalente, a exigência de uma mão-de-obra altamente especializada, a dificuldade de obtenção de alguns perfis em certas regiões e a falta de tradição em não se utilizar estruturas de aço em algumas regiões do Brasil. Ademais, segundo Fakury et al. (2017) outros dois fatores importantes a serem considerados nas estruturas em aço é a corrosão e o comportamento frente ao fogo. A corrosão é um processo espontâneo de perda de material por ação química do meio ambiente, essa perca de material pode acarretar a diminuição da seção transversal tornando o elemento inapto para desempenhar a função para qual foi projetado. Conquanto o aço seja incombustível suas características resistivas degeneram-se consideravelmente em situações de altas temperaturas.

2.3 PERFIS ESTRUTURAIS LAMINADOS E TUBULARES

O conhecimento dos perfis estruturais oferecidos no mercado, suas características e dimensões são fundamentais para que se possibilitem inúmeras alternativas para a execução de uma estrutura buscando a racionalização da construção. O conhecimento dos materiais pelos arquitetos, já na fase de projeto e o trabalho conjunto com a engenharia, determinando os formatos e as dimensões dos perfis adequados à forma arquitetônica, geram ao projeto a garantia da sua estabilidade estrutural, funcional e arquitetônica.

Os perfis de utilização corrente, segundo Silva e Panonni (2010, p.28) “são aqueles cuja seção transversal se assemelha às formas das letras I, H, U e Z, recebendo denominação análogas a elas. Os perfis que cuja seção transversal se assemelha a um L são

denominadas cantoneiras.” Ainda de acordo com Silva e Panonni (2010, p.28) “os perfis podem ser obtidos diretamente da laminação a quente ou da operação de conformação a frio ou de soldagem de chapas.” São denominados, respectivamente, de perfis laminados, formados a frio e a quente e soldados. Os perfis laminados a quente, assim como as chapas, são fabricados pela laminação a quente e conformados por uma sucessão de passes. Dentre os perfis laminados a quente destacam-se as cantoneiras de abas iguais e desiguais, perfis “W” e perfis “U”. Os perfis conformados a frio são elementos obtidos por meio da dobra a frio de chapas de aço, tendo algumas seções padronizadas, mas podendo ser produzidos com formas e tamanhos solicitados, são geralmente utilizados em construções mais leves como elementos de treliças e terças. As seções mais usuais são as do tipo “U”, “Z” e “I”.

Os tubos estruturais de aço são divididos em dois processos de produção principais, sendo eles os tubos de aço com e sem costura. Os tubos de aço com costura são produzidos normalmente a frio por conformação mecânica de bobina de aço ou chapas e são soldados em emendas contínuas. A soldas podem ser por fusão com adição de material ou sem adição.

Os tubos sem costura são fabricados por um processo conhecido por Mannesmann onde blocos de aço maciço são perfurados e laminados a quente, o processo consiste em um laminador, onde um pistão empurra o bloco aquecido contra a entrada do laminador. O bloco é forçado contra um a ponta de um mandril posicionado no centro do bloco gerando assim a forma tubular. Para se produzir seções tubulares quadradas ou retangulares, geralmente usa-se equipamentos de perfilação e são conformados a frio.

2.4 AÇOS ESTRUTURAIS

> O aço é uma liga metálica composta basicamente de ferro e de pequenas quantidades de carbono, que é o responsável por sua resistência. Na composição do aço também pode ser adicionados outros elementos para melhorar suas propriedades mecânicas, ou para fazê-lo adquirir propriedades especiais como, por exemplo, resistência a corrosão e resistência a temperaturas elevadas. Em função da composição química, é possível produzir diferentes tipos de aços estruturais com características diversas. (SOUZA, 2017, p.13).

Para o projeto e dimensionamento de elementos estruturais em aço, segundo Souza (2017), é importante conhecer o diagrama tensão versus deformação, que pode ser obtido por meio de ensaios de tração em corpos de prova padrões em que se definem as resistências ao escoamento (fy) e a resistência a ruptura (fu).

"Os aços estruturais mais comumente usados no Brasil, em função da qualidade proporcionada pela composição química, são classificados como aços-carbono e aços de baixa liga e alta resistência mecânica." (FAKURY et al., 2017, p.16)

De acordo com Fakury et al. 2017, os aços-carbonos são aqueles que possuem resistência ao escoamento máxima de 300 MPa, o nível de resistência desses aços deve-se à presença do carbono em quantidades entre 0,15% e 0,29% e do manganês, em porcentagem máxima de 1,5%. Também é comum a presença de silício, cobre, fósforo e enxofre. Para os aços de baixa liga e alta resistência o teor de carbono está entre 0,05% e 0,25% e de manganês inferior a 2%, acrescidos de elementos de liga, como cobre, níquel, cromo, nióbio, vanádio, molibdênio, titânio, entre outro.

"Esses aços foram desenvolvidos para proporcionar propriedades mecânicas superiores dos aços-carbonos, com baixo custo de produção, tendo resistência ao escoamento situada entre 275 MPa e 450 MPa." (FAKURY et al., 2017, p.16).

Os aços aprovados para uso em perfis, barras e chapas são aquelas com qualificação estrutural assegurada por Norma Brasileira ou norma ou especificação estrangeira, desde que possuam resistência ao escoamento máxima de 450 MPa e a relação entre resistências à ruptura (f_u) e ao escoamento (fy) não inferior a 1,18 (ABNT, NBR 8800).

Ademais, ainda segundo a ABNT NBR 8800, as propriedades mecânicas dos aços estruturais que devem ser consideradas para fins de cálculo são as descritas na tabela seguinte.

Tabela 1 – Constantes físicas do aço.

Módulo de elasticidade	E = 20000 kN/cm²
Módulo de elasticidade transversal	G = 7700 kN/cm²
Coeficiente de Poisson	υ = 0,3
Coeficiente de dilatação térmica	$\beta_a = 1{,}2 \times 10^{-5}\ {}^0C^{-1}$
Massa específica	$\rho_a = 7850\ kg/m^3$

Fonte: (NBR 8800, 2008).

Tabela 2 – Aços especificados por normas brasileiras para fins estruturais.

ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649/6650		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas finas (a frio/ a quente) de aço carbono para uso estrutural		
Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)	Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)	Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)
MR 250	250	400-560	CG-26	255	410	CF-26	260/260	400/410
AR 350	350	450	CG-28	275	440	CF-28	280/280	440/440
AR 350 COR	350	485				CF-30	_/300	_/490
AR 415	415	520						
ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5000		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossa, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)	Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)	Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	GR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450			
G-42	415	520	Q-40	380	480	GCR 500	370	490
G-45	450	550	Q-42	410	520	GCR 500A		
			Q-45	450	550			
ABNT NBR 5920/5921			ABNT NBR 8261					
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais					
Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)	Denominação	Seção circular		Seção quadrada e retangular		
CFR 400	_/250	_/380		fy (MPa)	fu (MPa)	fy (MPa)	fu (MPa)	
CFR 500	310/370	450/490	B	290	400	317	400	
			C	317	427	345	427	

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

Tabela 3 – Aços especificados segundo a ASTM.

Denominação	fy (MPa)	fu (MPa)	Produto	Grupo ou faixa de espessura	Grau	Classificação
ASTM A36	250	400 a 550	Perfis	1,2 e 3	-	Aço-carbono
			Chapas e barras	t ≤ 200 mm		
ASTM A500	230	310	Perfis	4	A	
	290	400			B	
ASTM A572	290	415	Perfis	1,2 e 3	42	Baixa liga e alta resistência mecânica
	345	450			50	
	380	485			55	
	415	520	Chapas e barras	1 e 2	60	
	450	550			65	
	290	415	Chapas e barras	t ≤ 150 mm	42	
	345	450		t ≤ 100 mm	50	
	380	485		t ≤ 50 mm	55	
	415	520		t ≤ 31,5 mm	60	
	450	550			65	
ASTM A242	345	485	Perfis e barras	1	-	Baixa liga e alta resistência mecânica e resistente a corrosão (patinável)
	315	460		2	-	
	290	435		3	-	
	345	480	Chapas e barras	t ≤ 19 mm	-	
	315	460		19 ≤ t ≤ 37,5 mm	-	
	290	435		37,5 ≤ t ≤ 100 mm	-	
ASTM A588	345	485	Perfis	1 e 2	-	Baixa liga e alta resistência mecânica e resistente à corrosão (patinável)
	345	480	Chapas e barras	t ≤ 100 mm	-	
	315	460		100 ≤ t ≤ 125 mm	-	
	290	435		125 ≤ t ≤ 200 mm	-	
Grupo 1 - perfis com espessura de mesa inferior ou igual a 37,5 mm						
Grupo 2 - perfis com espessura de mesa superior a 37,5 mm e inferior ou igual a 50 mm						
Grupo 3 - perfis com espessura de mesa superior a 50 mm						
Grupo 4 - perfis tubulares						

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

A norma brasileira NBR 8261, emitida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), visa estabelecer a encomenda, produção e o fornecimento de tubos de aço carbono, formados a frio, com e sem solda longitudinal, de seção circular, quadrada ou retangular, destinados para aplicação em estruturas soldadas, parafusadas e rebitadas.

2.5 DEFINIÇÕES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS QUE COMPOE UM GALPÃO

O galpão com uma ou duas águas é o modelo mais comum de todos os sistemas estruturais em aço. Essa tipologia comporta grandes extensões de área coberta, em um único pavimento, podendo chegar a dezenas de metros de comprimento.

A estrutura é geralmente composta por pórticos com espaçamentos regulares e sustentados por um sistema de vigas, terças ou tesouras, o que possibilita variedade e resistência. O vão central bastante amplificado permite o aproveitamento de vários tipos de coberturas para proteção, além da boa utilização para estocagens diversas, desde depósitos de produtos agrícolas ou produtos industrializados até estacionamentos e montagem de centros de distribuição para artigos variados.

Os principais elementos estruturais que compõe o edifício do tipo galpão são as terças, contraventamentos, vigas de cobertura e pilares.

Terças são vigas colocadas na cobertura, situados entre pórticos com a finalidade de suportar as telhas. Segundo Bellei (1998) as terças estão normalmente sujeitas às solicitações de flexão dupla e excepcionalmente flexão simples, provocadas pelas ações que atuam sobre as telhas, como cargas acidentais (chuva, poeira, pessoas caminhando na cobertura) e pelas cargas provocadas pelo vento, que podem ser pressão ou sucção.

De acordo com NETO e CUNHA (2017) usualmente emprega-se em terças vigas do tipo “U” ou “Z”, simples ou enrijecidos por apresentarem uma boa resistência aliada a um baixo peso por metro linear, o afastamento das terças que sustentam as telhas metálicas, para facilitar a montagem, não deve ser maior que 2,50, e por razões econômicas, não deve ser menor que 2,00m.

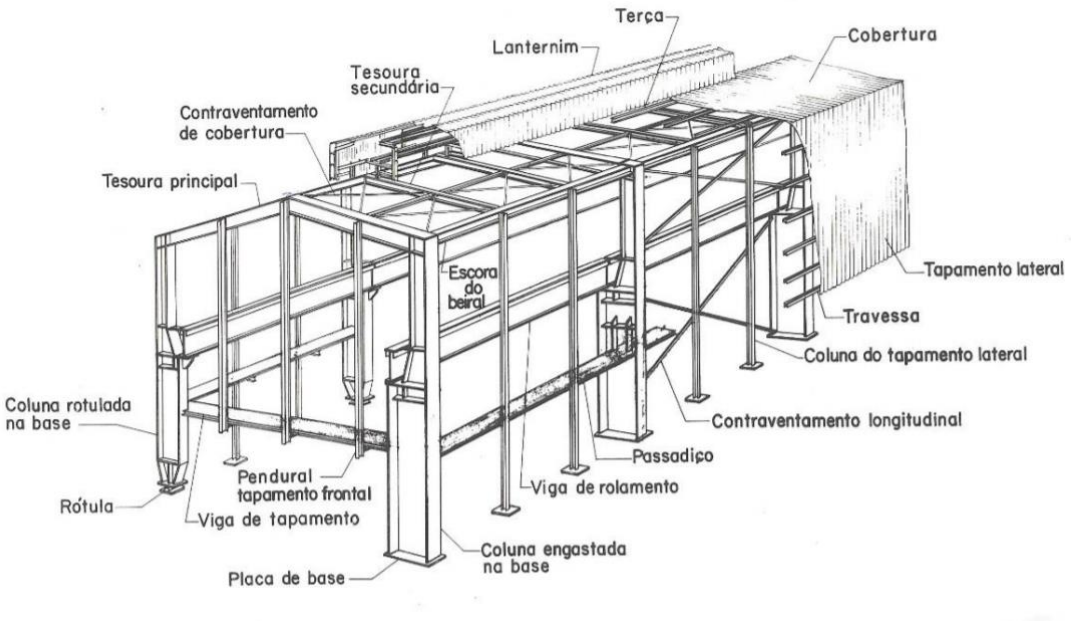
> Contraventamentos são barras colocadas nas estruturas com a finalidade de garantir a estabilidade do conjunto durante a sua vida útil e durante a fase de montagem, e para dar ao edifício uma rigidez espacial. Deve-se distinguir os contraventamentos horizontais que se encontram no plano das terças das tesouras ou vigas do pórtico. Os contraventamentos estão sujeitos, basicamente, aos esforços de tração e/ou compressão. (BELLEI, 1998, p.151).

O Contraventamento mais utilizado em galpões, de acordo com Fakury et al. (2017), tem a forma de X e é prática comum considerar apenas o trabalho das barras tracionadas. Tal procedimento é justificado por conseguir equilíbrio apenas com barras tracionadas, proporcionando uma condição mais econômica. Caso a compressão fosse considerada a esbeltez deveria ser menor evitando assim instabilidade o que acarretaria a um maior consumo de aço.

As treliças, tesouras, ou vigas de cobertura, de acordo com Neto e Cunha (2017) são responsáveis por transmitir as cargas da cobertura para os pilares e são largamente utilizadas para vencer grandes vãos.

Neto e Cunha (2017) ainda faz algumas orientações com relação ao dimensionamento na prática das tesouras, dentre eles o fato de as tesouras serem dimensionadas como treliças ideais cujos nós são articulados e considera-se somente esforços normais. Na prática existem outros esforços, mas são insignificantes e podem ser desprezado. Outro ponto importante é a uniformização dos perfis das diagonais e montantes. É importante também limitar o ângulo formado pelas diagonais e plano horizontal, limitado o no intervalo de 30° a 60°, já a inclinação do telhado depende do tipo de telha a ser utilizada.

Figura 2.2 – Elementos componentes de um galpão em estrutura metálica.



Fonte: BELLEI (1998).

2.6 CRITÉRIOS DE PROJETO

"O dimensionamento e a execução de uma estrutura pressupõem o atendimento às funções para as quais foi concebida, considerando sua vida útil estimada" (SOUZA., 2017, p.21).

A NBR 8800 baseia-se no método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto de estruturas de aço, nas quais os perfis de aço sejam laminados ou soldados, ou de seção tubular com ou sem costura e as ligações sejam executadas com parafusos ou soldas.

A NBR 16239 por sua vez vale-se de todas as prescrições da ABNT NBR 8800:2008. Complementarmente a norma fornece procedimentos específicos para o dimensionamento de barras submetidas à força axial de tração e barras submetidas à força axial de compressão de perfis tubulares.

São definidos como estados limites de uma estrutura, situações a partir das quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção. Conforme a NBR 8681/2003, os estados limites podem ser estados limites últimos ou estados limites de serviço.

2.6.1 Estados limites últimos

Os estados limites últimos estão relacionados ao colapso total ou parcial da estrutura, comprometendo a segurança dos usuários, e associados ao esgotamento da capacidade resistente, instabilidade e perda de equilíbrio.

2.6.2 Estados limites de serviço

Os estados limites de serviço estão relacionados a deficiências no desempenho para as condições de utilização, como, por exemplo, deformação e vibração excessiva.

2.7 AÇÕES E SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS DE AÇO.

"As estruturas devem ser projetadas para resistir a todas as ações atuantes durante a sua vida útil com segurança, desempenho e durabilidade adequada a sua utilização, com custos de construção e manutenção compatíveis" (SOUZA, 2017, p.21).

"O Principal objetivo a ser alcançado é tornar uma estrutura segura; para isso, a estrutura deve atender às expectativas de utilização que se propõe, durante toda sua vida útil, resistindo às ações solicitantes atuantes durante a edificação e utilização" (CHAMBERLAIN et al, 2013, p.22).

Os requisitos exigidos na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil são fixados pela norma ABNT 8681:2003, a norma estabelece os critérios de quantificação e definições das ações e das resistências a serem consideradas no projeto de edificações, esses critérios são utilizados para peças e estruturas constituídos dos materiais comumente utilizado na construção, inclusive o aço.

2.7.1 Ações e solicitações

"Por ação entende-se qualquer influência ou conjunto de influências capaz de produzir estados de tensão, deformação ou movimento de corpo rígido em uma estrutura" (FAKURY et al, 2015, p.33).

Segundo a NBR 8681:2003, ações são causas que provocam esforços e deformações nas estruturas e seus elementos, podendo ser classificadas em permanentes e variáveis.

2.7.1.1 Ações permanentes

Ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante a vida útil da construção. A NBR 8681 estabelece valores de referência para diversas ações permanentes. As ações permanentes podem ser: Ações permanentes diretas: Peso próprio da estrutura, pesos de elementos construtivos fixos e instalações permanentes. Empuxos de terra ou outros materiais granulosos, quando admitidos não removíveis, também podem ser considerados como permanentes. O item 4.5 da NBR 8800 fornece valores para cálculo do peso próprio da estrutura metálica. Os pesos de instalações permanentes usualmente são fornecidos pelos respectivos fabricantes. Ações permanentes indiretas: deslocamento de apoios, deformações impostas por fluência ou retração do concreto (estruturas mistas) e imperfeições geométricas. Os deslocamentos de apoio somente precisam ser considerados caso provoquem esforços significativos em relação ao conjunto de outras ações. Esses deslocamentos devem ser calculados com uma avaliação pessimista da rigidez da fundação (correspondente ao quantil 5% da distribuição de probabilidade).

2.7.1.2 Ações variáveis

Ações variáveis apresentam variações significativas durante a vida útil da construção. As cargas de utilização, de ação do vento ou devidas à variação de temperatura são ações variáveis. O anexo B da NBR 8800, a NBR 7188 e a NBR 6120 fornecem valores para as ações variáveis (ou cargas acidentais).

2.7.1.3 Ações excepcionais

Essas ações têm duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas. As explosões, choque de veículos, incêndios, enchentes e sismos são exemplos de ações excepcionais para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

2.8 CRITÉRIOS DE SEGURANÇA PARA VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES

O atendimento das condições de segurança nos estados limites depende de alguns fatores, sendo eles: Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a sua vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional. A condição de segurança pode ser expressa por desigualdade do tipo:

$(Sd; Rd) \geq 0$

onde Sd representa os valores de cálculo dos esforços atuantes obtidos com base nas combinações últimas correspondentes das ações e Rd representa os valores de cálculo dos esforços resistentes. Caso seja verificado isoladamente para cada tipo de esforço (prática mais comum), a condição acima pode ser escrita:

$Rd \geq Sd.$

Os estados limites de serviço estão relacionados com o comportamento da estrutura sob condições normais de utilização. De modo geral, a condição de segurança pode ser expressa por:

$Sser \leq Slim,$

onde Sser representa o valor do efeito estrutural de interesse, obtido com base na combinação de serviço e Slim representa o correspondente valor limite para esse efeito

referentes às ações e suas combinações (determinação de Sd ou das combinações para definição de Sser), bem como valores dos coeficientes de ponderação das resistências.

2.9 CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

"No Brasil, os códigos de projeto adotam o método dos estados limites como critério de introdução de segurança estrutural em projeto." (SOUZA, 2017, p.21).

2.9.1 Coeficientes de ponderação das ações

As ações são ponderadas pelos respectivos coeficientes γf, que são compostos por parcelas que levam em consideração a ocorrência, a variação e as possíveis considerações errôneas assim o coeficiente é dado por:

$\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3}$

Onde:

γ_{f1} considera a variabilidade das ações;

γ_{f2} considera a simultaneidade de atuação das ações;

γ_{f3} engloba possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, gerado por problemas construtivos ou por deficiência no método do cálculo empregado, superior ou igual a 1,10.

2.9.2 Combinações das ações de cálculo

As ações devem ser combinadas de várias maneiras diferentes, objetivando determinarem-se os efeitos mais nocivos para a estrutura. Portanto cada carregamento é formado por combinações especificas de ações que podem ser classificadas em normal, construtiva ou especial e excepcional.

"As ações atuam simultaneamente na estrutura, por períodos determinados ou por toda a vida útil da edificação, assim, carregamentos devem ser definidos combinando-se ações

que têm probabilidade de atuarem simultaneamente sobre a estrutura." (CHAMBERLAIN *et al*., 2013, p.23).

Ainda segundo Chamberlain *et al.* (2013) as combinações das ações devem gerar os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

As combinações para verificação de estado limites últimos podem ser classificadas em normais, especiais ou construtivas e excepcionais.

Combinação última normal – decorre do uso normal e previsto para a estrutura

$$\sum_{i=1}^{m}\left(\gamma_{gi}F_{Gi,k}\right)+\gamma_{q1}F_{Q1,k}+\sum_{j=2}^{n}\left(\gamma_{qj}\psi_{0j}F_{Qj,k}\right)$$

Onde:

$F_{gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável principal;

$F_{Qi,k}$ valores das ações variáveis secundárias.

Combinação especial construtiva:

$$\sum_{i=1}^{m}\left(\gamma_{gi}F_{Gi,k}\right)+\gamma_{q1}F_{Q1,k}+\sum_{j=2}^{n}\left(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef}F_{Qj,k}\right)$$

Combinação excepcional:

$$\sum_{i=1}^{m}\left(\gamma_{gi}F_{Gi,k}\right)+F_{Q,exc}+\sum_{j=1}^{n}\left(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef}F_{Qj,k}\right)$$

Nas combinações de estado limites de serviço devem ser utilizadas ações normais, ou seja, com coeficiente de ponderação γ_f = 1,0

Combinações quase permanentes – "Podem atuar durante um período da ordem da metade de vida útil da estrutura e são utilizadas para efeitos de longa duração e que

comprometem a aparência da construção, como, por exemplo, deslocamentos excessivos.” (SOUZA., 2017, p.27).

$$F_{ser}=\sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k}+\sum_{J=1}^{n}\left(\psi_{2j}F_{Qj,k}\right)$$

$\psi_2 F_{Qk}$ são os valores quase permanentes das ações variáveis

> Combinações frequentes – Tem duração da ordem de 5% da vida útil da estrutura ou se repetem da ordem de 10^5 vezes em 50 anos. São utilizadas para verificação de estados limites que não causam danos permanentes e/ou que estão relacionados ao conforto do usuário, como vibrações, movimentos laterais, empoçamento, abertura de fissura etc. (SOUZA, 2017, p.27).

$$F_{ser}=\sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k}+\psi_1 F_{Q1,k}+\sum_{j=2}^{n}\left(\psi_{2j}F_{Qj,k}\right)$$

F_{Q1} ação variável principal com seu valor frequente $\psi_1 F_{Q1,k}$

$\psi_{2j} F_{Qj,k}$ demais ações variáveis com seus valores permanentes.

> Combinações raras – Podem atuar por algumas horas durante o período de vida da estrutura. Utilizadas para estados limites irreversíveis, isto é, que causam danos permanentes à estrutura ou a outros componentes da construção, e para aqueles relacionados ao funcionamento adequado da estrutura, tais como formação de fissuras e danos ao fechamento (SOUZA, 2017, p.28).

$$F_{ser}=\sum_{i=1}^{m} F_{Gi,k}+F_{Q1,k}+\sum_{j=2}^{n}\left(\psi_{1j}F_{Qj,k}\right)$$

$F_{Q1,k}$ ação variável principal com seu valor característico.

$\psi_1 F_{Q,k}$ demais ações com seus valores frequentes.

A NBR 8800:2008 ainda estabelece valores limites de deslocamentos que devem ser obedecidos para o dimensionamento dos estados limites de serviço em estruturas metálicas.

2.10 FORÇAS DEVIDO AO VENTO (ABNT NBR 6123)

As ações nas estruturas, provenientes do vento, segundo Chamberlain et al. (2013) apresentam grande importância nas considerações para edifícios com elevada esbeltez. A NBR 6123:1988, versão corrigida 2019 fornece a velocidade básica do vento em todo território nacional, que é transformada em força atuante na edificação, levando-se em conta parâmetros como a forma da edificação e a existência de obstáculos em suas vizinhanças.

A norma estabelece como determinar as forças estáticas devidas ao vento levando em consideração a velocidade básica do vento, fatores topográficos, a rugosidade do terreno e fatores estatísticos. Calculado a velocidade característica do vento, levando em consideração os fatores anteriormente citados, é possível determinar a pressão dinâmica exercida na estrutura. A norma também define a metodologia de cálculo das pressões efetivas causadas pelo vento, podendo essas pressões serem forças de sobre pressão ou de sucção.

A força devido ao vento em uma edificação em qualquer elemento é dada basicamente por dois parâmetros. Um parâmetro meteorológico que está relacionado com a pressão dinâmica, provenientes das Equações de Bernoulli para escoamento associado a velocidade característica ou de projeto. A velocidade de projeto está relacionada com a velocidade básica do vento de acordo com a região que a edificação está localizada e fatores topográficos, fatores que levam em consideração a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação e altura acima do terreno. O outro parâmetro para o cálculo está relacionado com a aerodinâmica, à medida que o vento incide sobre as fachadas das edificações as correntes de ar geram pressões em torno da edificação.

2.11 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS PARA O DIMENSIONAMENTO

2.11.1 Barras tracionadas

“Elementos submetidos à tração são encontrados em barras de treliças, pendurais, barras de contraventamento, tirantes etc. Os elementos estruturais em aço, quando submetidos a esforços axiais de tração, não estão sujeitos a instabilidade.” (SOUZA, 2017, p.51).

> Como as barras tracionadas não são suscetíveis à instabilidade, a propriedade geométrica mais importante no dimensionamento é a área da seção transversal. No entanto, deve-se considerar que a área de trabalho dessas barras na região de ligação a outros componentes pode ser inferior à área bruta da seção transversal, em razão, principalmente, da presença de furos e da distribuição não uniforme da tensão de tração em decorrência de maior concentração próximas a parafusos e soldas. (FAKURY et al. 2016, p.95).

Em barras tracionadas pode ocorrer os seguintes estados-limites últimos, escoamento da seção bruta.

Uma forma de colapso ocorre quando a força de tração atuante em uma barra é igual a força axial de escoamento. Nessa circunstância a barra se encontra em situação de escoamento generalizado (plastificação) e sofrerá um alongamento excessivo, o que poderá causar a ruína do sistema da qual faz parte.

O dimensionamento de barras submetidas à força axial de tração deve ser efetuado conforme as prescrições da ABNT NBR 8800. Para perfis tubulares, entretanto, a ABNT NBR 16239:2013 traz em seu escopo no item 5 uma equação de coeficiente de redução de área que representa com maior precisão o comportamento dos perfis tubulares.

No dimensionamento de barras prismáticas submetidas a força axial de tração, segundo a NBR 8800, a força axial de tração solicitante de cálculo tem que ser de igual ou inferior valor da força axial resistente de cálculo.

Considerando a força axial de tração resistente a ser usada no dimensionamento deverá ser o menor dos valores obtidos, levando em conta os estados limites de escoamento da seção bruta e ruptura de seção líquida.

2.11.2 Barras comprimidas

“Elementos sujeitos à compressão são encontrados em sistemas de treliça, travejamentos, sistemas contraventados de edifícios, comumente em colunas de edificações quaisquer. (CHAMBERLAIN et al.,2013, p,48).

Segundo Fakury et al. (2017) as barras comprimidas podem ser encontradas em vigas e pilares comprimidos e em alguns tipos de contraventamento. No dimensionamento das barras comprimidas é necessário considerar a instabilidade da barra, suposta com curvatura inicial e é necessário verificar a flambagem local dos elementos componentes da seção transversal da barra.

"Ao contrário dos esforços de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito. Os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por flambagem por flexão." (PFEIL, PFEIL, 2009, p119).

Considera-se que a barras sempre apresentem uma curvatura inicial, com um deslocamento transversal proporcional ao comprimento da barra. Com o aumento da força de compressão axial o deslocamento transversal é acrescido até não resistir mais às solicitações, provocando um estado-limite último chamado por instabilidade global por flexão usualmente chamado de flambagem.

Em linhas gerais, à medida que a força axial de compressão se eleva, o deslocamento aumenta e, consequentemente, as tensões na barra. À medida em que a seção mais solicitada começa a escoar, caracteriza-se nessa seção a formação de uma rotula plástica que não necessariamente leva ao colapso, mas pode significar o estado limite de serviço e causar transtornos e inquietações aos usuários.

O dimensionamento de barras submetidas a força de compressão é elaborado conforme o item 5.3 da NBR 8800:2008.

2.11.2.1 Coeficiente de redução da área líquida

O coeficiente de redução da área líquida tem valor 1,00 quando a força de tração for transmitida diretamente para cada um dos elementos da seção transversal da barra, seja por solda ou parafuso. Quando a força de tração foi transmitida somente por soldas transversais o coeficiente de redução é a relação em área da seção dos elementos conectados e a área bruta da seção transversal. Em barras com seções transversais abertas, quando a força de tração for transmitida somente por parafusos ou somente por soldas longitudinais ou ainda por combinação de solda transversal e longitudinal.

2.11.2.2 Limite de esbeltez

O índice de esbeltez de uma barra é a relação entre o comprimento destravado e o raio de giração. A NBR 8800 recomenda que o índice não ultrapasse 300 excetuando-se tirantes de barras redondas pré-tensionadas ou outras barras que tenham sido montadas com pretensão.

Segundo Chamberlain et al. (2013) nas peças tracionadas o limita-se o índice de esbeltez para reduzir os efeitos da vibração, haja vista que a esbeltez não é um fator fundamental, já que a própria natureza da ação de tração proporciona retilinidade. Chamberlain et al. (2013) ainda recomenda que nas peças principais e compostas a esbeltez seja limitada a valores menores ou iguais a 240, nas peças secundárias limitada a valores menores ou igual a 300.

A recomendação de limitação do índice de esbeltez, para peças tracionadas, segundo Fakury et al., (2017) tem o objetivo de evitar que as barras fiquem demasiadamente flexíveis e, como consequência, apresentem deformação excessiva causada pelo peso próprio ou por choques durante o transporte e a montagem e evitar vibrações de grande intensidade que possam causar desconforto aos usuários.

2.11.3 Barras fletidas

“As vigas, que funcionam normalmente como elementos horizontais de transmissão de cargas para pilares ou outros elementos da estrutura, inclusive outras vigas, são o principal elemento estrutural sujeito a esse tipo de solicitação.” (FAKURY et al., 2017, p.161).

> No dimensionamento, as vigas devem ser verificadas aos estados-limites últimos relacionados ao momento fletor e à força cortante. Sob a atuação do momento fletor, o colapso pode ocorrer por plastificação total da seção transversal, por flambagem da viga (flambagem lateral com torção) ou por flambagem local dos elementos parciais ou totalmente comprimidos da seção transversal. (FAKURY et al., 2017, p.163).

"O colapso de uma barra submetido à flexão pode ocorrer pela formação de rótulas plástica, por instabilidade local dos elementos constituintes da seção ou por flambagem local." (SOUZA, 2017, p.87).

"As seções tubulares circulares, por sua veza, são axissimétricas e possuem capacidade resistente muito elevada a torção, razões pelas quais não sofrem flambagem lateral com torção e, assim, o único estado-limite aplicável a elas é a flambagem local da parede (FLP)." (FAKURY et al., 2016, p.161).

2.11.4 Barras sob esforços combinados.

"Os elementos que compõem um sistema estrutural estão sujeitos a diversos tipos de solicitação: estas solicitações podem ocorrer isoladamente ou combinadas, sendo a ocorrência combinada a mais comum." (CHAMBERLAIN et al., 2013, p.71)

No dimensionamento, as barras submetidas a combinação de esforços solicitantes devem ser verificadas simultaneamente, por meio de uma expressão de interação, aos estados-limites últimos causados por força axial e momento fletor e, isoladamente, aos estados limites últimos causados pela força cortante. As barras também devem ser verificadas aos estados-limites de serviço, com destaque, por exemplo, para a flecha, no caso de terças e travessas de tapamentos, e para o deslocamento horizontal dos pilares dos pórticos. (FAKURY et al., 2017. p.223)

A NBR 8800, em seu item 5.5, dispõe o procedimento para verificação das barras prismáticas submetidas à combinação de esforços solicitantes.

2.11.5 Particularidades da NBR 16239

Para o dimensionamento de edificações em perfis tubulares são válidas todas as diretrizes estabelecidas pela NBR 8800:2008, em contrapartida a NBR 16239:2013 traz alguns complementos às prescrições da NBR 8800:2008 de forma a refletir com mais fidelidade o comportamento dos perfis tubulares. Esses complementos da norma estão relacionados a procedimento específico para o dimensionamento de barras de perfis tubulares submetidas a tração e compressão, mais precisamente está relacionado ao valor do coeficiente de redução da área líquida e o fator de redução associado a

resistência à compressão. Esses itens podem ser encontrados na seção 5 da NBR 16239:2013.

Outros procedimentos adicionais estão presentes na NBR 16239:2013 nas seções 4, 6, 7, 8, 9 e 10 e no Anexo A que estão relacionados à análise estrutural de treliças, ligações metálicas, ligações flangeadas, ligações de base de pilar, vigas mistas, pilares mistos e soldas respectivamente.

2.12 LIGAÇÕES

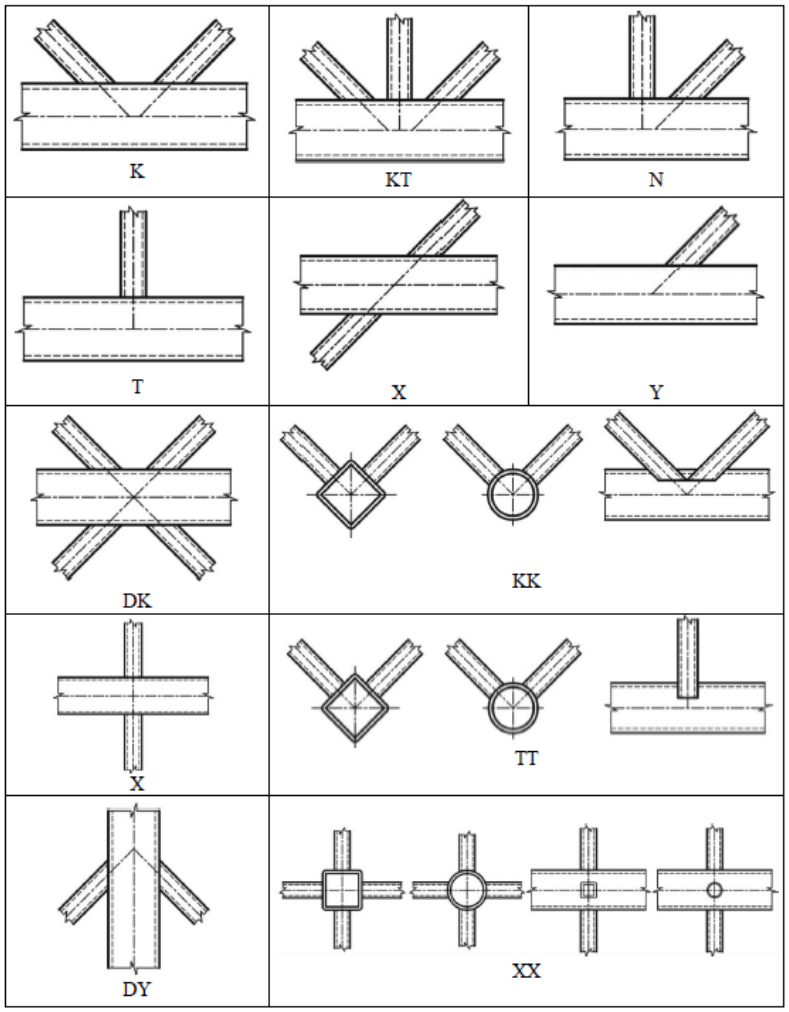
> As ligações, por vezes denominadas nós, são utilizadas para transferir esforços entre os elementos que formam a estrutura e entre seus apoios. A ligação consiste dos dispositivos (ou meios) de conexão como parafusos, pinos ou soldas, e os elementos são chapas, placas de base, enrijecedores e cantoneiras de assento. Já o nó é definido como a região onde os elementos são conectados, incluindo os dispositivos e elementos de ligação, bem como trechos dos elementos estruturais que devem ser conectados, possibilitando a transferência de esforços (SOUZA, 2017, p.129).

Os elementos e meios de ligação, segundo Fakury et al. (2017), devem ser dimensionados aos estados-limites últimos, de modo que possuam esforços resistentes de cálculo iguais ou superiores aos esforços solicitantes de cálculo.

“Aspectos econômicos aliados a facilidades práticas levam a uma maior utilização da solda nas operações de fábrica e do parafuso no canteiro de obras, na montagem da estrutura. Por exemplo, na ligação entre viga e pilar, é usual, na fábrica, soldar a chapa na extremidade na viga e, na obra, parafusar essa chapa no pilar.” (FAKURY et al., 2017, p.244).

No caso de estruturas tubulares, utiliza-se, de acordo ao tipo de encontro entre as barras, uma terminologia associada a letras. Utiliza-se letras do alfabeto para designar a disposição entre as barras, tais como “T” para o encontro entre montante e banzo, “N” para o entro entre diagonal e montante, “K” para o encontro de diagonais inclinadas e “KT” para o encontro de cinco barras.

Figura 2.3 – Tipos de ligações com perfis tubulares

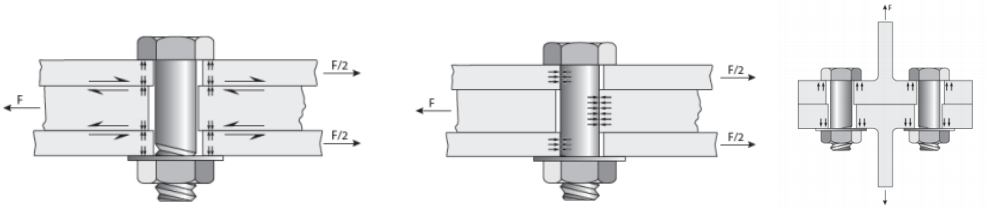


Fonte: NBR 16239:2013.

2.12.1 Ligações parafusada

"Nas ligações parafusadas podem ser utilizados parafusos comuns parafusos de alta resistência e, excepcionalmente, parafusos sem qualificação estrutural. A transferência de esforços entre as partes conectadas pode acontecer por cisalhamento e contato, por tração ou por atrito". (SOUZA, 2017, p.130).

Figura 2.4 – Mecanismos de transferência de esforços, cortante por atrito, cortante por contato e tração respectivamente.



Fonte: Silva e Pannoni (2010).

2.12.2 Ligações soldadas

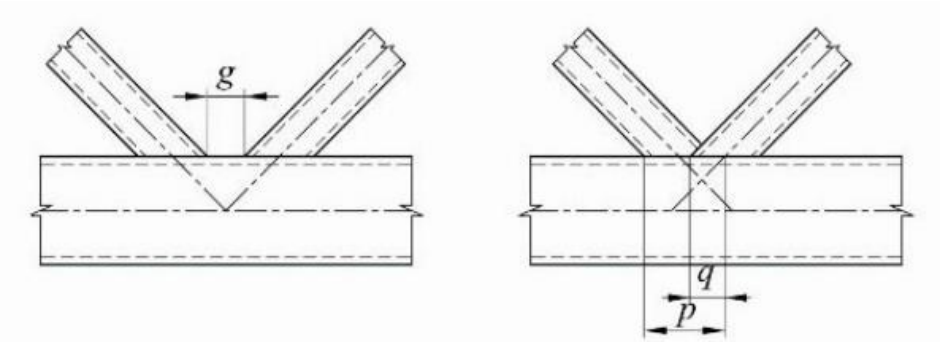
> Segundo a American Society Welding (AWS), soldagem é um processo para união de metais e/ou não metais obtendo a união localizada produzida por aquecimento dos elementos a serem conectados com ou sem adição de material e pressão. Além disso, a soldagem é um processo de ligação que visa garantir a continuidade física e química na junta (região em que as peças serão unidas por soldagem); o resultado dessa operação é denominado solda. (SOUZA, 2017, p.144).

"As conexões soldadas são mais rígidas. A ausência de reentrâncias de parafusos e porcas facilita a limpeza e a pintura, além de melhorar o acabamento final. São mais simples de serem executadas em estruturas existentes". (SILVA e PANNONI, 2010, p. 228).

"A resistência de uma junta soldada pode ser limitada pela ruptura da seção efetiva da solda ou pelo escoamento do metal base na face da fusão." (SOUZA, 2017, p.154).

As treliças que utilizam perfis tubulares, segundo Araújo et al. (2016), podem ser formadas de diversas configurações de tubos, com seção circular, quadrada e retangular, ligados diretamente por solda, geralmente em todo o perímetro ou por meio de chapas como elementos de ligação entre as barras. Para ligações soldadas são possíveis configurações com ou sem superposição de barras, geralmente chamadas de ligações com sobreposição ou com afastamento.

Figura 2.5 – Ligações com afastamento e sobreposição

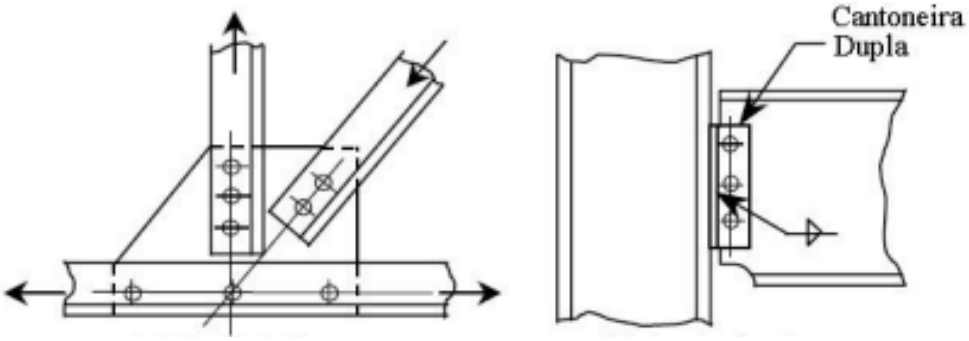


Fonte: ABNT NBR 16239.

2.12.3 Elementos de ligação

Os elementos de ligação, segundo Souza (2017) são as chapas de gusset, placas de base, chapas de extremidade, chapas de topo, enrijecedores e cantoneiras e assento. Esses elementos são utilizados com frequência para transferência de esforços entre os diversos elementos conectados. Cantoneiras de alma e assento e enrijecedores são comumente utilizados para transferência de esforços em ligações viga-pilares, chapas de gusset são utilizadas para facilitar a ligação entre barras da treliça, e placas de base fazem a interface entre pilares de aço e bases em concreto.

Figura 2.6 – Ligação com chapa e cantoneira.



Fonte: Souza (2017).

2.12.3.1 Ligação viga-pilar

As ligações entre vigas e pilares têm grande influência no comportamento global de estruturas de edifícios, seja com relação à rigidez ou a resistência. De modo geral, o

> comportamento destas ligações é idealizado para facilitar a análise e o dimensionamento estrutural. Assim os elementos estruturais podem ser representados por barras e suas ligações por nós idealmente rígidos ou articulados (flexíveis). O nó rígido pode ser entendido como aquele que não existem rotações relativas significativas entre as barras nas quais há transferência integral de momentos fletores das vigas para os pilares. No nó articulado, ao contrário, não há transferências significativas de momentos fletores entre viga e pilar, e a rotação relativa entre esses elementos é livre. (SOUZA, 2017, p.187)

As respostas de uma estrutura às ações solicitantes, de acordo com Chamberlain et al. (2013), são relacionadas aos graus de liberdades e rigidezes das uniões, ou seja, à sua capacidade de impedir a rotação relativa local de peças ligadas. Por essa razão, no modelo de análise estrutural, deve-se indicar corretamente o grau de rigidez de cada união de modo que seu comportamento seja condizente com o modelo de ligação que será executado.

A NBR 8800:2008 estabelece limites para classificação das ligações quanto a rigidez em seu item 6.1.2.

2.12.3.2 Ligação de base de pilares

As ligações entre pilares metálicos e a fundação é feita por meio de placas de base e chumbadores. É fundamental definir o tipo de vinculação no momento do cálculo e dimensionamento dessas ligações para que se possa estudar a ação dos esforços nos pilares e a transferência dessas ações para os elementos de fundação.

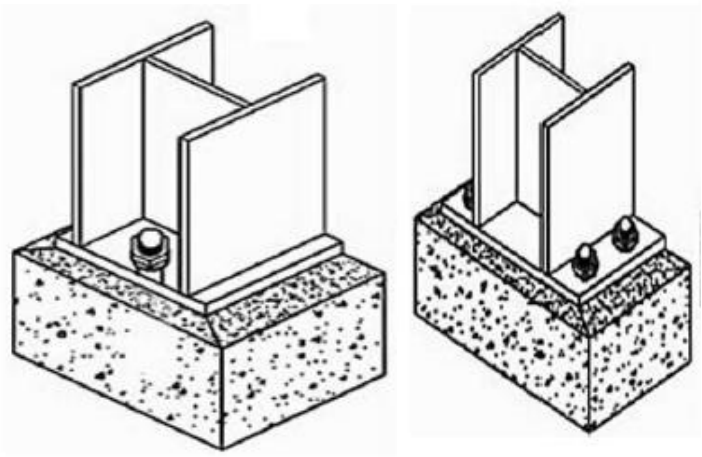
A ligação é constituída de uma placa de base retangular ou circular soldada ao perfil de aço do pilar e fixada no bloco de fundação por meio de barras redondas rosqueadas (chumbadores). Os elementos componentes da ligação devem ser dimensionados de forma que que seus esforços resistentes de cálculo aos estados-limites últimos aplicáveis sejam iguais ou superiores aos esforços solicitantes de cálculo, determinados pela análise da estrutura, sujeita às combinações de cálculo das ações, conforme a ABNT NBR 8800 (ABNT, NBR 16239, 2013).

Conforme Fakury et al. (2017), de modo geral, pode-se definir, usualmente, a ligação entre pilar e base como engastadas e rotulada. As bases engastadas, transmitem forças

axiais e momentos fletores para a fundação, já as bases rotuladas transmitem somente forças axiais.

Segundo Bellei (2004) existem dois tipos básicos de base para unir-se pilar a fundação, sendo eles, bases rotuladas e barras engastadas. As bases rotuladas são dimensionadas para resistir a cargas verticais e horizontais sem levar nenhum momento às fundações, já as bases engastadas são utilizadas para dar maior rigidez às deformações laterais.

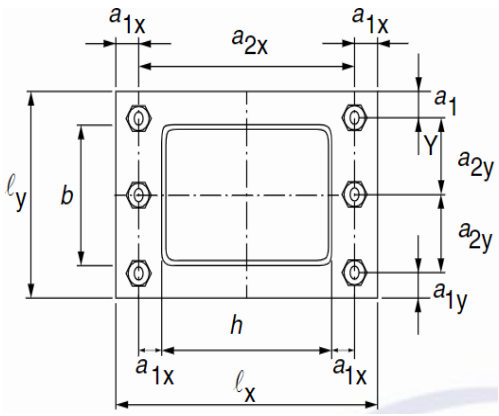
Figura 2.7 – Base rotula e engastada, respectivamente.



Fonte: Bellei (2004).

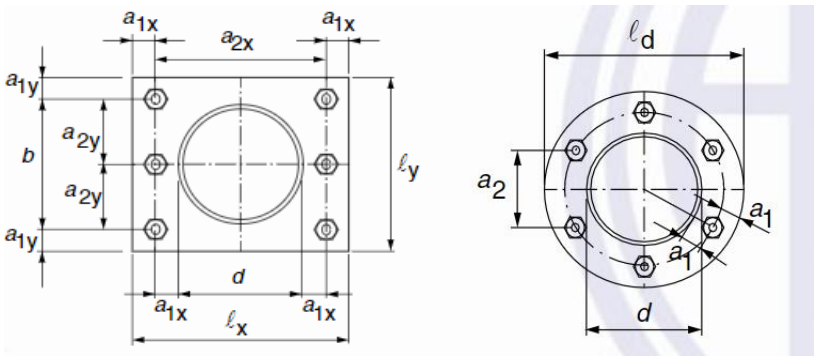
Araújo et al. (2016) informa que para estruturas tubulares são previstos 3 tipos de ligação: uma para pilares tubulares retangulares e duas para pilares circulares. A ligação tipo 1 aplica-se aos pilares retangulares e constitui-se de uma placa retangular enquanto as ligações tipo 2 e 3 aplicam-se às circulares e são constituídas de placas retangulares e circulares respectivamente. No caso de pilares de aço, a maior dimensão da seção transversal não pode ser superior a 510 mm. Essa limitação é necessária para evitar-se momentos fletores na região sobre o pilar maiores que na seção crítica.

Figura 2.8 – Ligação do Tipo 1.



Fonte: NBR 16239

Figura 2.9 – Ligação Tipo 2 e 3.



Fonte: NBR 16239.

2.13 ANÁLISE ESTRUTURAL

Segundo Leet, Uang e Gilbert (2009) para iniciar-se o estudo da análise estrutural é preciso examinar a relação entre planejamento, projeto e análise. Durante esse processo é preciso primeiramente estabelecer uma ou mais configurações iniciais das formas estruturais possíveis, estimando o peso próprio, selecionando as cargas de projeto e então é feito a análise estrutural. Se os resultados obtidos forem consoantes com os pré-estabelecidos o projeto estará concluído. Como a maioria das estruturas é analisada com o auxílio do computador é necessário ao projetista desenvolver uma compreensão do comportamento estrutural, para que possa verificar se os resultados são razoáveis.

> A análise estrutural é classificada como elástica de primeira ordem se as relações de equilíbrio são estabelecidas com base na geometria indeformada (ou original) da estrutura, e os materiais dos elementos estruturais são considerados com o comportamento sempre elástico-linear. Esse tipo de análise é o mais simples e bastante familiar dos profissionais que militam na área de engenharia de estruturas. (FAKURY et al., 2016, p.89).

A análise estrutural tem por objetivo a obtenção dos esforços, deslocamentos dentre outros diversos efeitos produzidos pelas ações impostas à conformação estrutural. A análise estrutural, pode ser dividida em três partes: a determinação das cargas atuantes no sistema estrutural, análise preliminar e análise final. A análise preliminar da estrutura é a obtenção dos esforços internos e as deflexões que os elementos que a constituem estão submetidos devido a aplicação das cargas máximas que atuarão no sistema. A análise final do sistema estrutural será a interpretação dos resultados obtidos na análise preliminar.

> A análise de estruturas de barras requer do profissional experiência não apenas no manuseio das ferramentas computacionais, mas, na mesma medida, experiência como projetista de estrutura de modo a traduzir no modelo de análise, da forma a mais adequada possível, as condições reais da estrutura. Para isso merecem destaque as condições dos apoios da estrutura (vínculos externos) e as condições da estrutura real decorrente da tipologia dos elementos de ligação entre as barras. (FAKURY et al., 2016, p.96).

3 METODOLOGIA

3.1 PRÉ-DIMENSIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

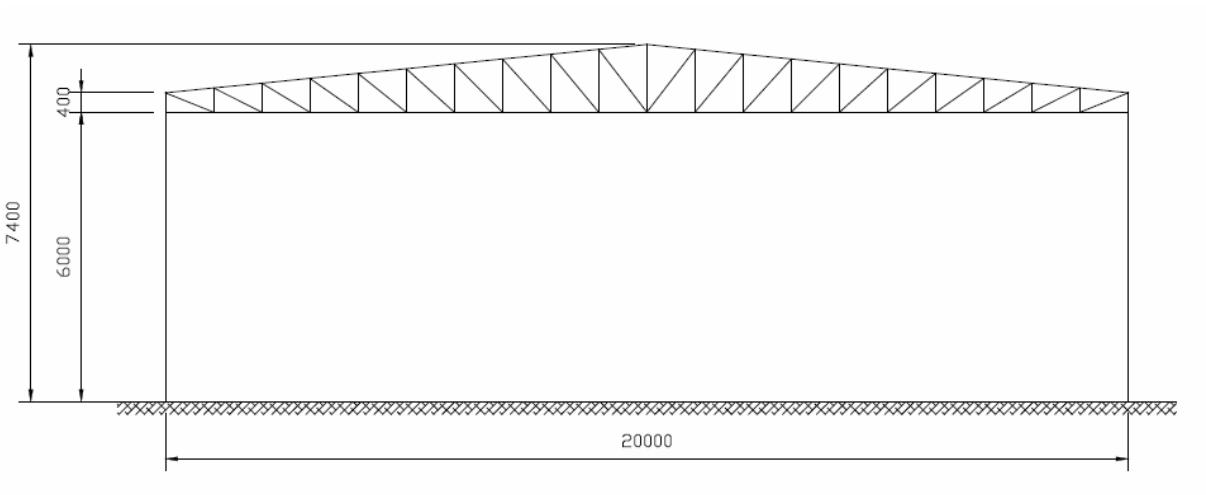
3.1.1 Características da edificação

A edificação em análise é constituída de vão principal com 20 metros de largura e extensão de 30 metros, o pé direito livre foi estabelecido em 6 metros de altura. O local teórico a ser implantando a edificação em questão é o município de Goiânia em Goiás, em terreno plano, com poucos obstáculos em seu entorno.

3.1.2 Arranjo estrutural

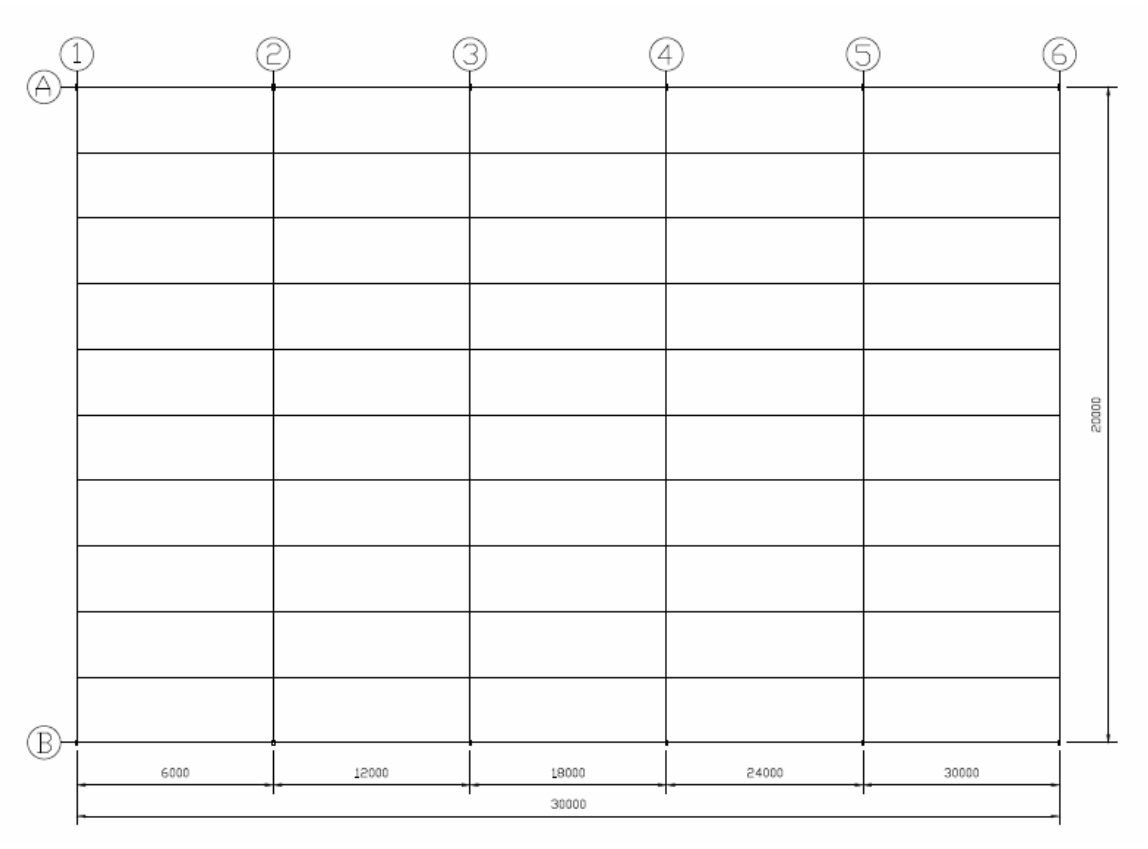
Para a elaboração do arranjo estrutural e geometria do galpão ficou definido o galpão do tipo duas águas com treliça do tipo trapezoidal, bastante utilizada em vão maiores que 15 metros e bastante usual na região. Utilizando-se da relação h/50 para a altura do primeiro montante, sendo “h” o vão principal, que, para o vão de 20 metros, resulta em uma altura de 40 centímetros. A inclinação do banzo superior, bem como o distanciamento entre as terças é resultado da escolha do tipo de cobertura. Para a análise em questão ficou definido uma inclinação mínima de 10% e distanciamento entre terças máximo de 2,10 metros, devido a inclinação do banzo a cumeeira ficou a uma altura de 7,40 metros. O distanciamento entre os pórticos ficou definido em 6 metros, tamanho usual na prática, o que resultou em 6 pórticos igualmente espaçados. Um corte longitudinal e a planta baixa do arranjo estrutural são mostrados nas figuras a seguir.

Figura 3.1 – Corte longitudinal



Fonte: Autor.

Figura 3.2 Planta baixa



Fonte: Autor.

Para o estudo em questão foi definido duas soluções para análise estrutural e de consumo de aço, sendo a primeira solução com perfis laminados a quente, frio e chapas dobradas, bastante usual. A segunda solução foi definida com perfis tubulares sem costura fabricadas pelo processo de extrusão e laminação obliqua.

- Solução 1: Perfis laminados a frio e a quente (chapa dobrada);
- Solução 2: Perfis laminados a quente (Perfis tubulares sem costura).

Elementos mais simples como as linhas de corrente, os contraventamentamentos laterais e de cobertura foram mantidos com o mesmo tipo de perfis e geometria para não gerarem distorção nos resultados. As dimensões desses elementos poderiam variar conforme a necessidade para a obtenção do melhor resultado, entretanto não foi o caso do estudo, haja vista a uniformidade das ações e carregamentos.

3.2 DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS

3.2.1 Ações permanentes

Para a determinação da carga permanente definiu-se primeiramente o tipo de telhamento a ser utilizado, para todas as soluções, utilizou-se a telha do tipo trapezoidal simples de aço galvanizado com peso próprio de 0,05 kN/m². Para os outros elementos, como terças, linhas de corrente e travamento de terças, o peso próprio, foi definido pelo programa.

3.2.2 Sobrecarga em cobertura

Seguindo a recomendação da norma NBR 8800, na ausência de especificações mais rigorosas, foi previsto uma sobrecarga característica mínima de 0,25 kN/m². Considera-se que essa sobrecarga englobe as cargas decorrentes de instalações elétricas, hidráulicas e eventuais peças fixadas na estrutura de cobertura.

3.2.3 Vento – ABNT NBR 6123

Para determinação das ações provocadas pela ação do vento foi utilizada os parâmetros estabelecidos pela NBR 6123 para a edificação em estudo, sendo edifício de planta retangular com duas águas de cobertura. Os cálculos de pressão dinâmica, coeficientes de pressão e forma externo e para telhados com duas águas foram feitos com ajuda do programa VisualVentos, que auxilia, principalmente, na elaboração dos gráficos e obtenção dos esforços.

3.2.3.1 Dados do vento

- Velocidade básica do vento, retirada do mapa de isopletas, V¬0 = 35 m/s;
- S1 = 1,00. Terreno plano ou fracamente acidentado;
- S2 = 0,80. Categoria IV (zona industrial com cota média dos obstáculos igual a 10m) -Classe B (maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 e 50 m);
- S3¬ = 1,00. Grau 2 (edificação para comércio e indústria com alto fator de ocupação).

A velocidade característica do vento é calculada multiplicando-se a velocidade básica do vento pelos fatores anteriormente expostos e embasados no item 4.2 da norma resultam em uma velocidade característica (Vk) de 27,91 m/s.

Em posse da velocidade característica do vento é possível determinar a pressão dinâmica, baseado no item 4.2 b da NBR 6123 da seguinte forma:

$q = 0{,}613 * Vk^2$

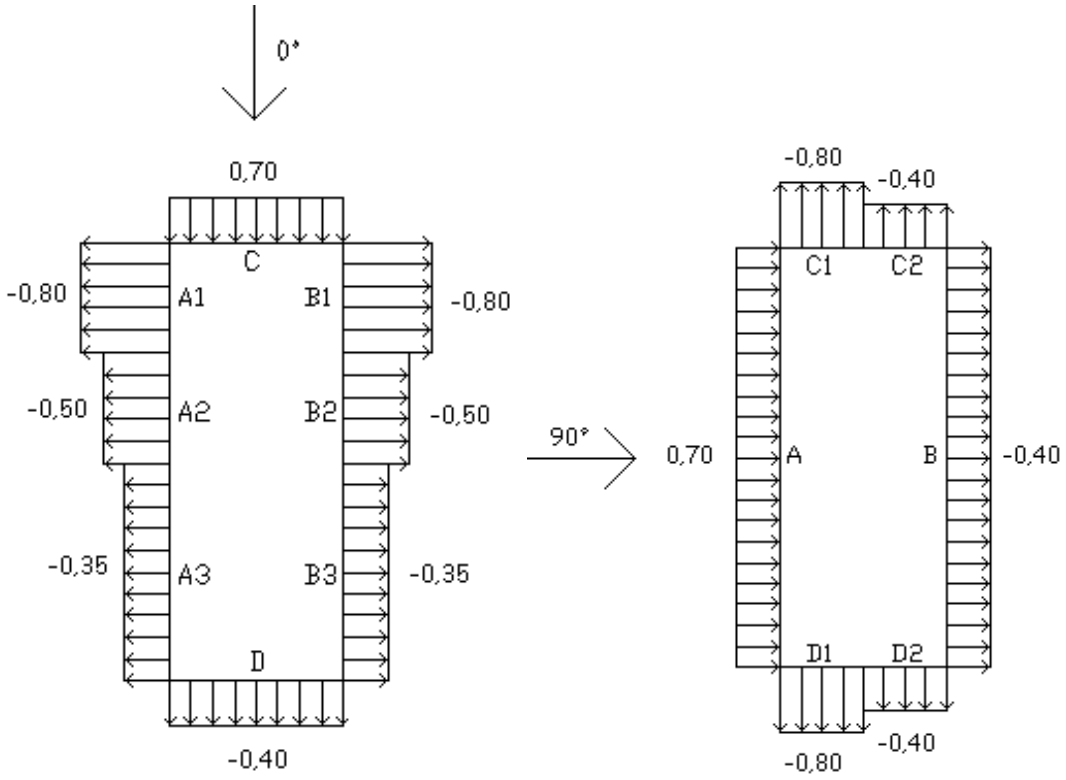
$q = 0{,}613 * 27{,}91^2$

$q = 0{,}48\ kN/m^2$

Para a edificação em estudo foi considera quatro faces igualmente permeáveis. Os coeficientes de pressão e forma, externos, foram calculados de acordo com os dispostos

no item 6.2 da norma de ventos, utilizando as dimensões da edificação obteve-se os seguintes coeficientes.

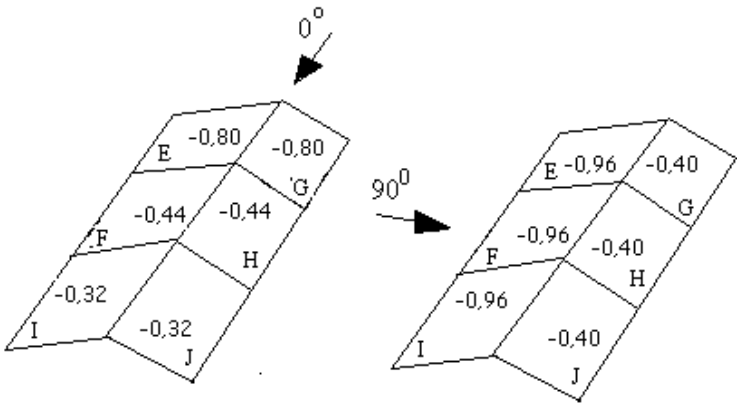
Figura 3.3 – Coeficiente de pressão e forma, externos para paredes de edificação de planta retangular.



Fonte: Visual Ventos.

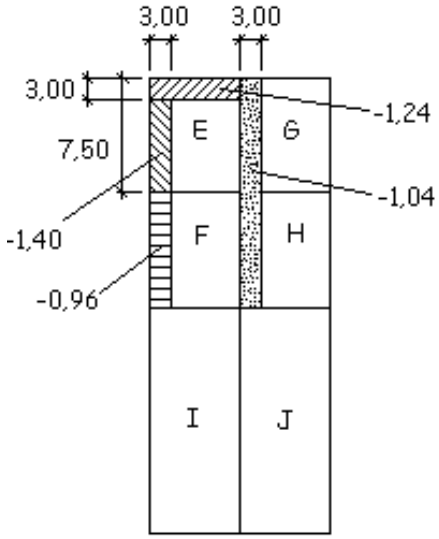
Para a edificação em análise, como foi definido anteriormente, telhado com duas águas, simétricos os coeficientes para os telhados, calculados segundo a norma estão representados a seguir, com o auxílio do programa VisualVentos.

Figura 3.4 – Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricas, em edificações de planta regular.



Fonte: Visual Ventos.

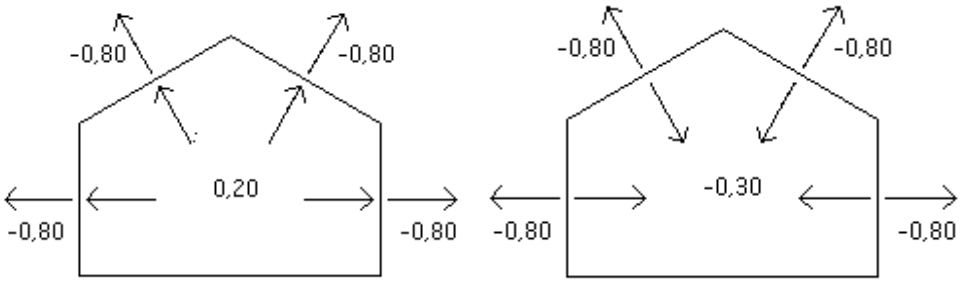
Figura 3.5 – Cpe Médio.



Fonte: Visual Ventos.

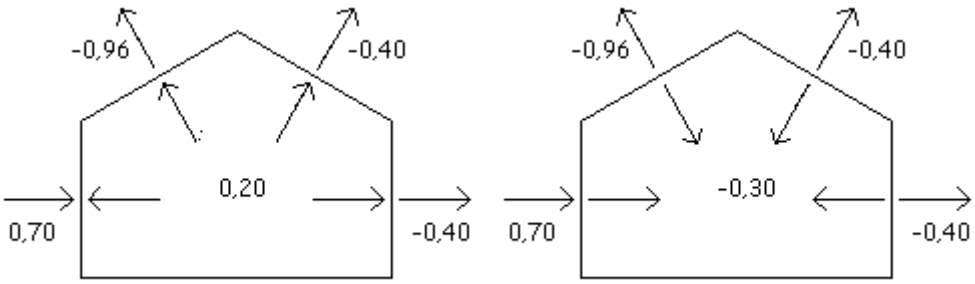
Por fim, apresenta-se na figura a seguir as combinações utilizadas para as combinações críticas de carregamento de ação do vento a serem utilizados no projeto.

Figura 3.6 – Combinações dos coeficientes de pressão vento a 0º, cpi 0,20 e -0,30.



Fonte: Visual Ventos

Figura 3.7 – Combinações dos coeficientes de pressão vento a 90º, cpi 0,20 e -0,30.



Fonte: Visual Ventos.

3.3 ANÁLISE COMPUTACIONAL

O cálculo estrutural foi realizado por meio do software CYPE3D, o programa considera um comportamento elástico linear dos materiais. Partindo das ações básicas é possível calcular e definir qualquer tipo de combinação, sendo de acordo com as normas utilizadas ou definidas pelo operador.

Todas as combinações são fornecidas para cada estado-limite, segundo o material e normas estabelecidas. O programa em seu manual de operação destaca todos os métodos e parâmetros utilizados para o cálculo das diversas análises que são realizadas para a obtenção do resultado. Para as ligações, sejam soldadas ou parafusadas, é

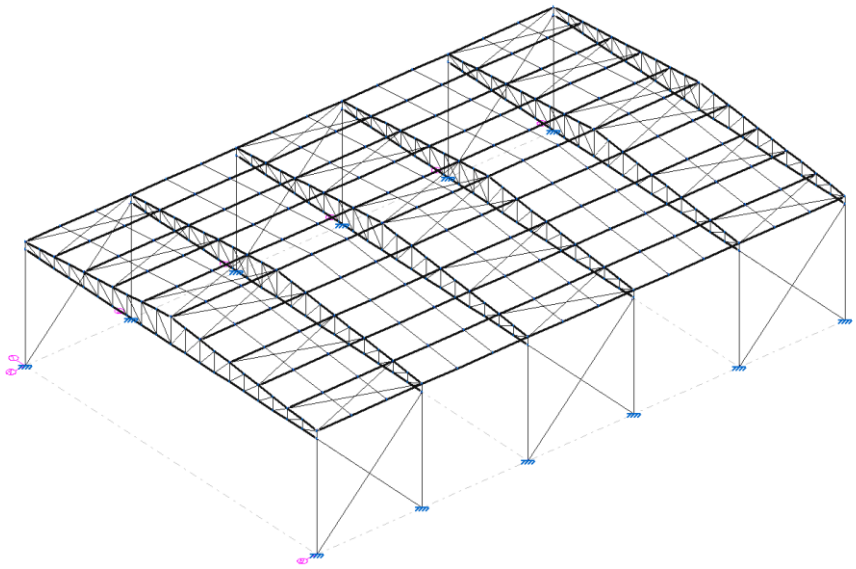
necessário, entretanto, uma análise mais especifica, haja vista a necessidade de um conhecimento inerente ao comportamento teórico e em campo das ligações.

Para o lançamento inicial das barras, nas duas soluções, é preciso determinar as dimensões dos elementos para se ter uma base de partida para o cálculo, é preciso juntamente às dimensões e geometrias dos elementos que compõe a solução definir a orientação dos elementos em relação ao seu eixo de forma que o elemento desempenhe aproveitando suas melhores características em todas as direções. No pré-lançamento da geometria das sessões ficou estabelecidos os parâmetros propostos por Bellei (1998) que preconiza a utilização de sessões para pilares com 1/20 a 1/30 de relação à altura total dos pilares, 1/40 da largura do vão utilizado para se determinar a altura do primeiro montante, no caso de treliça trapezoidal. Para a geometria dos elementos, na primeira solução, ficou definido como perfis “U” para os banzos superior e inferior, cantoneira de abas simétricas para as diagonais, perfis do tipo “U” enrijecido para as terças. Tais configurações foram determinadas buscando a facilidade de instalação e são usuais em galpões de pequenos vão. Na segunda solução buscou-se “igualar” em dimensão de perfis, utilizando os perfis tubulares, de forma a conceber uma solução arquitetonicamente semelhante a primeira. Nas duas soluções foi prezado a padronização dos elementos semelhantes. Segundo Neto e Cunha (2017) a grande variedade de perfis num projeto, ao contrário de economizar, se gerará mais custos, mais detalhes e maiores riscos de erro durante a montagem.

Tendo as situações anteriormente expostas o exercício de dimensionamento da estrutura ficou em se estabelecer configurações de dimensões e espessura dos elementos e as vinculações corretas de forma a se obter um modelo de cálculo que representasse da melhor maneira as situações propostas. Foi preconizado, de maneira igual, a busca pela solução mais leve e que atendesse aos parâmetros de norma.

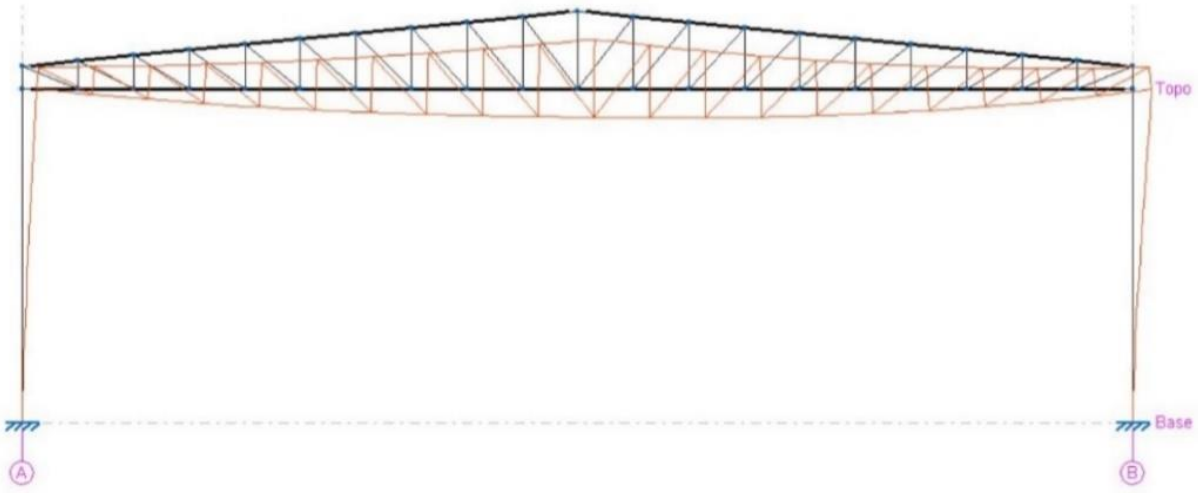
A figura a seguir mostra o modelo de cálculo em três dimensões utilizada nas duas soluções.

Figura 3.8 – Modelo de cálculo.



Fonte: Cype3D.

Figura 3.9 Verificação de deslocamentos



Fonte: Cype3D.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos para as duas soluções, assim também como a análise e interpretação de resultados obtidos. Serão feitas algumas discussões a respeito dos parâmetros adotados e a influência de diversos fatores na obtenção dos resultados.

4.1 CONSUMO DE AÇO

O resultado obtido para as duas soluções é apresentado na tabela a seguir.

Tabela 4 – Consumo por elemento de cada solução.

Solução	**Material**	**Elemento**	**Peso (kg)**	**Peso Total (kg)**	**Peso por área (kg/m²)**
1- (Perfis de abas paralelas)	A-572 345MPa	Pilares	1.096,49	6.768,04	11,28
		Correntes	110,45		
		Montantes e Diagonais	953,33		
		Travamento Cobertura	56,63		
		Travamento Lateral	57,02		
	CF-26	Banzos	2.252,59		
		Terças	2.241,53		
2- (Perfis tubulares sem costura)	A-572 345MPa	Pilares	1.809,56	6.334,67	10,56
		Banzos	1.133,75		
		Montantes e Diagonais	925,73		
		Travamento Cobertura	56,63		
		Travamento Lateral	57,02		
		Correntes	110,45		
	CF-26	Terças	2.241,53		

Fonte: Autor.

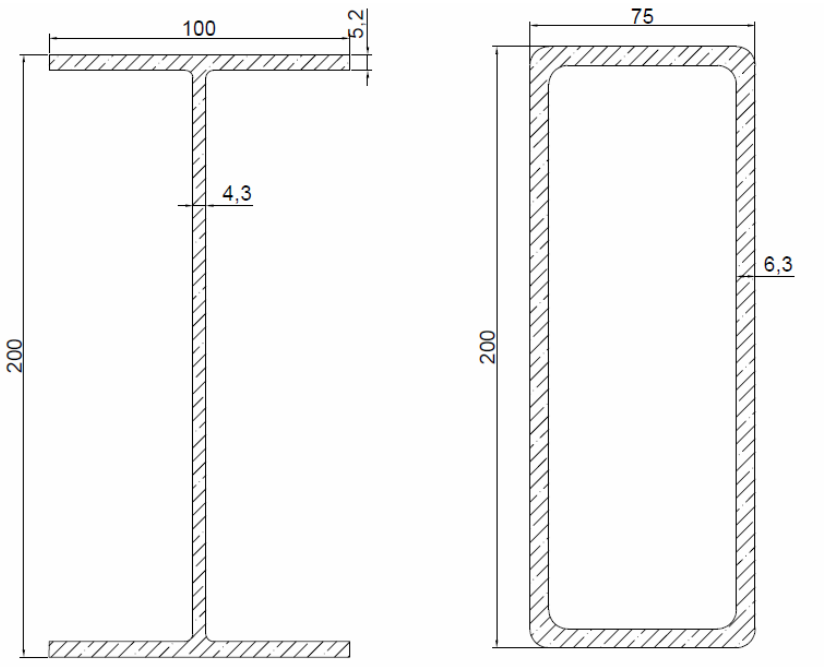
Para a solução 1, perfis de abas paralelas, obteve-se um consumo total de 6.768,04 kg de aço, sendo um consumo por metro quadrado de 11,28 kg. Já para solução 2 foi obtido um consumo total de 6.334,67 kg e 10,56 kg por metro quadrado de construção. A

solução 1, em perfis laminados de abas paralelas, apresenta um resultado cerca de 6,82% mais pesado do que a solução 2 em perfis tubulares sem costura.

4.2 COMPARAÇÃO DE SEÇÃO

O elemento que teve a maior diferença de peso foram os pilares, essa diferença é justificada pela maior espessura do perfil tubular e devido ser um elemento de seção fechada, abaixo a figura mostra a diferença de seções entre os pilares das duas soluções.

Figura 4.1 - Comparação de seções.



Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

As vantagens das construções em aço são diversas, a velocidade da montagem, o aumento da área útil da edificação aliado a versatilidade das estruturas torna as soluções em estruturas metálicas um forte concorrente quando se almeja escolher uma solução estrutural.

O projetista, entretanto, deve conhecer os diversos parâmetros no momento da concepção estrutural de forma a aproveitar da melhor forma possível os pontos fortes de tais concepções, um parâmetro fundamental, que o projetista deve conhecer, é a correta escolha do tipo de perfil metálico a ser empregado no projeto, a grande variedade de perfis e elementos estruturais em aço torna a escolha uma disciplina a parte do projeto.

Nesse contexto, a análise apresentada buscou expor a viabilidade da utilização de perfis tubulares na concepção de obras corriqueiras por meio do estudo comparativo do consumo de aço por área de construção. O consumo de aço é um parâmetro apropriado para se avaliar o custo e, não necessariamente, o desempenho da estrutura, haja vista que o aço é comumente vendido pelo seu peso.

O consumo de aço não deve ser fator último na decisão de qual solução adotar considerando-se que há diversos outros fatores que são essenciais na avaliação global de uma solução estrutural, fatores como o atendimento integral de todas as prescrições normativas, a interação com as outras disciplinas de projeto, a disponibilidade de certos tipos de perfis estruturais na região e as imposições arquitetônicas.

Os perfis estruturais tubulares, parte desse trabalho, possuem algumas vantagens a serem levadas em consideração no momento da concepção estrutural, sua geometria permite boas resistências a esforços axiais e o reforço por meio de preenchimento sem a necessidade de se utilizar fôrmas.

Ademais, faz-se necessário um estudo mais aprofundado das ligações utilizadas nos perfis tubulares, haja vista esse tipo de concepção de treliça plana utilizando perfis tubulares não é corriqueira.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

As ligações entre elementos de uma estrutura são fundamentais para conduzir a uma solução que atenda a todos os parâmetros normativos, desempenhe conforme foi projetado e não onere a construção de forma a torná-la inviável. Para as treliças considera-se nós rotulado para o dimensionamento, entretanto, para o caso de treliças tubulares as barras secundárias incorporam rigidez nos nós o que introduz momentos

fletores ao longo do banzos, fazendo com que possa haver a necessidade de serem dimensionados, além das forças axiais, à momentos fletores.

As dimensões da edificação são fatores primordiais no dimensionamento da estrutura, tais fatores tem influência direta na quantidade de aço utilizada, para o caso de perfis tubulares é necessário estudos de viabilidade para diferentes dimensões.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros é sugerido:

- Estudo das ligações em treliças com perfis tubulares, levando em consideração a rigidez introduzida por elementos secundários;
- Estudar a viabilidade de treliças tubulares para diferentes comprimentos de vãos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, **Manual of steel construction**, 14a.ed, Chicago, AISC, 2015, Printed in U.S.A.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION-AISC. **Hollow Structural Sections**, Connections Manual, 1997

ARAÚJO, A. H. M.; SARMANHO, A. M.; BATISTA, E. M.; REQUENHA J. A. V.; FAKURY, R. H.; PIMENTA, R. J. **Projeto de estrutura de edificações com perfis tubulares de aço.** Belo Horizonte, Ed do Autor, 2016.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 14724**: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT_____. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT_____. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas- Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT_____. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT_____. **NBR 16239**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

BELLEI, I. H. **Galpões industriais em aço**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1998. 489 p.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O.; **Edifícios de múltiplos andares em aço.** São Paulo: Pini, 2004. 454p.

BELLEI, l. H. **Edifícios industriais. Projeto e cálculo em aço**. São Paulo: PINI, 2010.

CHAMBERLAIN, Z.M.; FICANHA, R.; FABEANE, R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço: Edifício Industrial Detalhado.** São Paulo, Elsevier, 2013.

FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos**. São Paulo, Prentice Hall Brasil, 2015, 496p

JAVARONI, C. E. **Estruturas de aço: dimensionamento de perfis de aço formados a frio**. Rio de Janeiro, Editora Campos, 2014.

KUZMANOVIC, B. O.; WILLEMS, N. **Steel Design for Structural Engineers.** New Jersey, Prentice-Hall, 1977.

LEET, K. M.; UANG, C.H.; GILBERT, A. M. **Fundamentos da análise estrutural.** Porto Alegre, AMGH Editora LTDA, 2009.

MENDANHA, F. **Estudo de Ligações de Treliças Planas com Perfis de Seção Tubular.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2006

NETO, J. X.; CUNHA, A. S. **Manual prático das estruturas metálicas: Projetos, Dimensionamentos, Laudos Técnicos e Especificações Aplicadas a casos reais.** São Paulo, PINI, 2017.

PFEIL, M.; PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** Rio de Janeiro, LTC. 2008.

PINHEIRO, A. C. F. B.; CRIVELARO, M. **Estruturas metálicas: cálculo, detalhes, exercícios e projetos.** Sâo Paulo, Editora Edgard Blucher, 2005.

PRAVIA, C. M. Z.; DREHMER, A. G.; JÚNIOR, M. E. **Galpões para usos gerais.** 4ª ed. Rio de Janeiro, 2010. 76 p.

SANTOS, A. L. E. F. **Ligações de Barras Tubulares para Estruturas Metálicas Planas.** 2003. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, V. P.; PANNONI. F. **Estruturas de Aço para edifícios - aspectos tecnológicos e de concepção.** São Paulo, Editora Blucher,2010.

SOUZA, A. S. C. **Dimensionamento de elementos e ligações em estrutura de aço.** São Carlos, SP, Editora EdUFSCar, 2017.

ANEXO A

Solução	Material	Designação	Elemento	Perfil	Peso (kg)	Peso Total (kg)	Peso por área (kg/m²)
1-(Perfis de abas paralelas)	A-572 345MPa	H	Pilares	W 200x15	1.096,49	6.768,04	11,28
		Cantoneira	Correntes	L1.1/2 x 1/8"	110,45		
			Montantes e Diagonais	L1.1/2 x 1/8"	953,33		
		Barra redonda	Travamento Cobertura	1/4"	56,63		
			Travamento Lateral	3/8"	57,02		
	CF-26	U	Banzos	U150X50X4.76	2.252,59		
		C	Terças	C125X50X17X3.35	2.241,53		
2-(Perfis tubulares sem costura)	A-572 345MPa	Tubo Retangular	Pilares	200x75x6.30	1.809,56	6.334,67	10,56
		Tubo Quadrado	Banzos	55x3.00	1.133,75		
		Tubo Circular	Montantes e Diagonais	32xSCH40	925,73		
		Barra redonda	Travamento Cobertura	1/4"	56,63		
			Travamento Lateral	3/8"	57,02		
		Cantoneira	Correntes	L1.1/2 x 1/8"	110,45		
	CF-26	C	Terças	C125X50X17X3.35	2.241,53		