

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNA SANTOS DE ALCÂNTARA FARIA
HEMILLY SILVA DE ARAÚJO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM PÓRTICO METÁLICO ATRAVÉS DO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC2)

CURITIBA

2019

BRUNA SANTOS DE ALCÂNTARA FARIA

HEMILLY SILVA DE ARAÚJO

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM PÓRTICO METÁLICO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr., Rodrigo Villaca Santos

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Análise estrutural de um pórtico metálico através do método dos elementos finitos", realizado pelas alunas Bruna Santos de Alcântara Faria e Hemilly Silva de Araújo, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Marco Antônio Luersen

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 02 de dezembro de 2019.

RESUMO

FARIA, Bruna Santos de Alcântara; ARAÚJO, Hemilly Silva. Análise estrutural de um pórtico metálico através do método dos elementos finitos. 70 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho tem como propósito elaborar uma análise estrutural de um pórtico metálico através do Método dos Elementos Finitos, utilizando como base o *software* comercial ANSYS. Esta análise se deve pelo fato de não haver informação suficiente que justifique o uso de determinados tipos de perfis de viga e de pilar na construção de pórticos metálicos. Portanto, realizou-se uma análise dos três perfis comerciais mais utilizados, para se aplicar nas vigas e nos pilares, realizando uma análise combinatória dos perfis. Primeiramente, efetuou-se o pré-dimensionamento do pórtico, que teve como base o ábaco para construção de pórticos. Em seguida, foi efetuada a escolha do material para se utilizar nos perfis. Desse modo, os perfis foram escolhidos através do catálogo. Depois da definição dos perfis, determinou-se o carregamento inicial para ser aplicado de forma distribuída ao longo das vigas de cobertura. Na determinação do carregamento inicial, além do ábaco para determinar o peso dos elementos que compõe o telhado e a combinação de carregamento, utilizou-se como base, também, a norma ABNT NBR 6123, relativa à força do vento na estrutura. A partir dos dados coletados, a análise foi realizada e gerou-se resultados de modo a obter o deslocamento máximo e a resistência mecânica, esta última através das tensões diretas e combinadas. Através dos resultados verificou-se quais combinações se enquadravam no deslocamento máximo exigido pela norma ABNT NBR 8800/2008 e quais combinações se comportaram abaixo do limite de escoamento do material. Posteriormente, foi realizada uma verificação dos resultados obtidos do modelo no ANSYS através de outro *software* denominado Ftool, que possui licença gratuita. Além da análise de resistência mecânica, realizou-se também análises relativas ao peso da estrutura e ao custo de projeto. Como resultado de todas as análises realizadas, verificou-se que a combinação de perfil de viga retangular e de pilar retangular é a mais vantajosa considerando os parâmetros adotados.

Palavras-chave: elementos finitos. pórtico metálico. ANSYS. tipos de perfis.

ABSTRACT

FARIA, Bruna Santos de Alcântara; ARAÚJO, Hemilly Silva. Structural analysis of a metallic frame by the finite element method. 70 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Department of Mechanical, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This academic work aims to present a structural analysis of a metallic frame using the Finite Element Method, made on the commercial software ANSYS. This analysis is justified by the lack of enough information that explain the application of certain profile types in beams and in pillars for the building of metallic frames. Therefore, research on the three most recommended profiles was made, to be applied in the beams and in the pillars, by a combinatory analysis of the profiles. At first, the frame was pre sized by using the frame building abacus. After that, the profile materials were specified and it was possible to find the profile sizings in the catalog. The initial load was determined by using the abacus, which is necessary to determine the load combination and the weight that is on top of the beam such as roof tiles, and the norm ABNT NBR 6123, which is used to determine the wind force in a frame. The load was distributed along the beams. From the collected data, the analysis was applied aiming to obtain the mechanical resistance by terms of displacement and stress, and this last one in terms of direct stress and maximum and minimum combined stress. By the results, it was possible to verify which combinations fit the maximum displacement required by the norm ABNT NBR 8800/2008 and which combinations were below the material yield stress. Besides the mechanical resistance analysis, a financial and a weight analysis were made. After that, a verification of the obtained results in the ANSYS model was made by another software called Ftool, a free licence software. As a result of all the analysis, it was verified that the profile combination between a rectangular beam and a rectangular pillar was the most viable considering the adopted parameters.

Keywords: finite elements. metallic frame. ANSYS. profile types

L ISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alguns tipos de perfis.....	12
Figura 2 – Alguns tipos de pórticos.	13
Figura 3 – Solução aproximada através de malhas pelo MEF.	17
Figura 4 – Tipos de Elementos.....	20
Figura 5 – Matriz de Rigidez de alguns elementos.....	21
Figura 6 - Diferença entre os modelos de viga de Timoshenko e de Euler-Bernoulli	22
Figura 7 - Graus de liberdade de uma viga tridimensional.	23
Figura 8 - Deslocamentos verticais a serem considerados.	25
Figura 9 - Dimensões principais de um pórtico.	29
Figura 10 - Dimensão do Perfil para Vigas Biapoiadas sem balanço.....	30
Figura 11 - Dimensões do pórtico estudado (dimensões em metros).	31
Figura 12 - Gráfico para flambagem.....	32
Figura 13 - Medidas perfil I.....	34
Figura 14 - Perfil I para a cobertura.....	35
Figura 15 - Perfil I para os pilares.	35
Figura 16 - Medidas perfil C.	35
Figura 17- Perfil C para vigas.....	36
Figura 18 - Perfil C para pilares.....	36
Figura 19 - Dimensões do perfil retangular.	36
Figura 20 - Perfil retangular para vigas.	37
Figura 21 - Perfil retangular para os pilares.	37
Figura 22 - Valores de C_x e C_y para o perfil I.....	39
Figura 23 - Valores de C_x e C_y para o perfil C.....	39
Figura 24 - Mapa de Velocidade do vento no Brasil.....	40

Figura 25 - Definição de z_q	41
Figura 26- Fator S_2	42
Figura 27- Fator S_3	42
Figura 28 - Fator de Redução.	43
Figura 29 - Peso estimado para elementos presentes no pórtico.	44
Figura 30 - Elementos que compõem o pórtico.....	44
Figura 31 – Carregamento ao longo das vigas de cobertura.....	46
Figura 32 – Modelo do ANSYS contendo a malha obtida	47
Figura 33 - Gráfico contendo variação da deformação para cada combinação.	51
Figura 34 - Gráfico contendo variação na tensão direta máxima para cada combinação.....	52
Figura 35 - Gráfico contendo variação na tensão direta mínima para cada combinação.	52
Figura 36 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Máxima para Viga I .	54
Figura 37 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Máxima para Viga C.	54
Figura 38 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Máxima para Viga Retangular.....	55
Figura 39 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Mínima para Viga I. .	55
Figura 40 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Mínima para Viga C.	56
Figura 41 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Mínima para Viga Retangular.....	56
Figura 42 - Gráfico referente à massa total de cada configuração.....	58
Figura 43 - Custo para cada Combinação.....	60
Figura 44 - Comparação da deformação entre os tipos de vigas.....	61
Figura 45 - Definição dos perfis no Ftool.....	62
Figura 46 - Valor da espessura mínima mais próxima.	63

Figura 47 - Deslocamento máximo na viga retangular no Ftool.	63
Figura 48 – Deslocamento (com amplificação para efeitos de visualização)	64
Figura 49 - Resultados ANSYS como via de comparação.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do Aço A36.	33
Tabela 2 - Combinação de perfis.	34
Tabela 3 - Cálculo de força, realizado em planilha do Excel.	45
Tabela 4 - Resultado da combinação viga e pilar do tipo I.	48
Tabela 5 - Resultado da combinação viga I e pilar C.	48
Tabela 6 - Resultado da combinação viga I e pilar retangular.	49
Tabela 7 - Resultado da combinação viga e pilar do tipo C.	49
Tabela 8 - Resultado da combinação viga C e pilar I.	49
Tabela 9 - Resultado da combinação viga C e pilar retangular.	49
Tabela 10 - Resultado da combinação viga e pilar do tipo retangular.	50
Tabela 11 - Resultado da combinação viga retangular e pilar C.	50
Tabela 12 - Resultado da combinação viga retangular e pilar I.	50
Tabela 13 - Massa total de cada perfil.	57
Tabela 14 - Massa total para cada combinação.	58
Tabela 15 - Custo para cada elemento do pórtico.	59
Tabela 16 - Preço por combinação	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

GDL – Graus de Liberdade

MEF – Método dos Elementos Finitos

PO – Professor Orientador

TCC 1 – Trabalho de Conclusão de Curso 1

TCC 2 – Trabalho de Conclusão de Curso 2

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS	14
1.2	OBJETIVOS	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	16
2.1.1	Introdução	16
2.1.2	Tipos de Análise	18
2.1.3	Formulação	19
2.1.4	Tipos de Elementos	19
2.1.4.1	<i>Elemento Viga</i>	21
2.1.4.2	<i>Pórtico plano</i>	24
2.2	NORMA ABNT NBR 8800/2008	24
2.2.1	Introdução	24
2.2.2	Itens da Norma	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	27
4	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO PÓRTICO	29
4.1	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS	29
4.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PILARES	31
4.3	MATERIAL DOS PERFIS	32
4.4	DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS	33
4.4.1	Dimensionamento do perfil I	34
4.4.2	Dimensionamento do perfil C	35
4.4.3	Dimensionamento do perfil Retangular	36
4.5	DIMENSIONAMENTO DA FORÇA ATUANTE NO PÓRTICO	38
4.5.1	Força devido ao vento	38
4.5.2	Força devido a ações permanentes	43
4.5.3	Resultado da força utilizada para a análise	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	RESULTADOS	48
5.1.1	Resistência mecânica	48
5.1.1.1	<i>Deslocamento</i>	51
5.1.1.2	<i>Tensão direta</i>	52
5.1.1.3	<i>Tensões Combinadas</i>	54
5.1.2	Peso	57
5.1.3	Custo	59
5.2	VALIDAÇÃO DA NORMA ABNT NBR 8800/2008	60
5.3	VERIFICAÇÃO	61
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	67

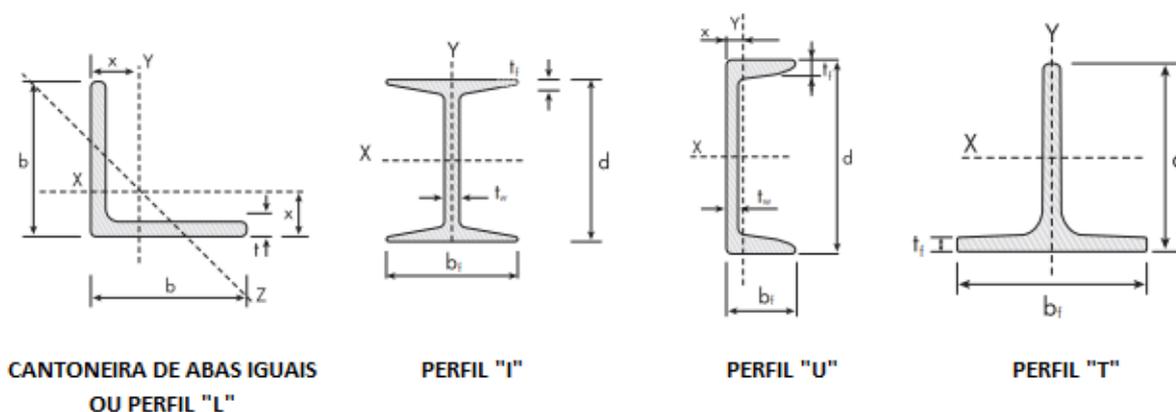
1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas notou-se um aumento progressivo do uso de estruturas metálicas para construções civis. Estas estruturas, normalmente feitas de ligas de aço, são empregadas em edifícios comerciais, shoppings, pontes, passarelas, galpões, coberturas de ginásios, academias esportivas, entre outras (NARDIN, 2012).

Atualmente há uma estimativa de que grande parte das construções em aço no Brasil seja de estruturas simples, como as de único pavimento e as de coberturas. Dentro desse segmento, uma parcela significativa das construções metálicas é a de galpões industriais, pois resulta em uma solução econômica satisfatória e de grande versatilidade, dado que se pode aplicá-los em pequenas fábricas, lojas, academias, depósitos, ginásios, garagens etc. (NARDIN, 2012, p.2 e PINHO, p.1)

Com a fabricação de perfis laminados (Figura 1) “os galpões em pórticos ganharam competitividade, com soluções simples, rápidas e econômicas.” (PINHO, p.1)

Figura 1 - Alguns tipos de perfis.



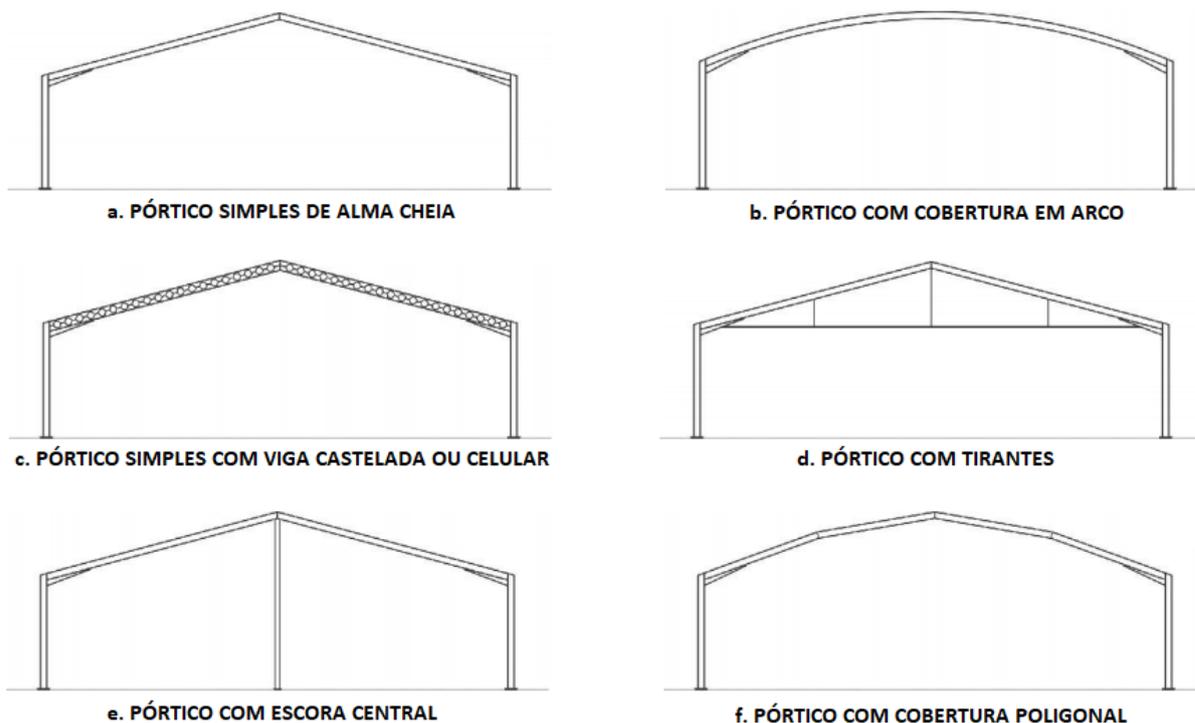
Fonte: Os autores, tendo como referência GERDAU, 2009.

Existem dois tipos básicos de galpões em pórticos: os pórticos de alma cheia, e os pórticos treliçados. Para o estudo em questão se fará uso do pórtico de alma cheia, que utiliza os perfis laminados como elementos principais da estrutura (PINHO, p.1).

As construções de alma cheia resultam em pórticos mais rígidos, limpos, com menor número de elementos, de fabricação facilitada além de montagem e manutenção simples (PINHO, p.1).

Existem inúmeras tipologias utilizadas em pórticos com perfis laminados, conforme apresenta a Figura 2. Alguns dos mais utilizados são: pórtico simples de alma cheia, pórtico com cobertura em arco, pórtico simples com viga castelada ou celular, pórtico com tirantes, pórtico com escora central, pórtico com cobertura poligonal, entre outros.

Figura 2 – Alguns tipos de pórticos.



Fonte: Os autores, tendo como referência PINHO, p.2.

O modelo a ser utilizado nesse estudo tem como base o pórtico simples de alma cheia, representado na letra “a” da Figura 1, por ser uma estrutura simples e simétrica com cobertura inclinada. Neste modelo, utiliza-se normalmente um vão livre de 15 a 45 metros, e altura de 5 a 12 metros. A inclinação da cobertura necessita que esteja entre 5° e 20° e ainda, tem-se que o espaçamento entre os pórticos seja entre 6 e 12 metros (PINHO, p.2).

No dimensionamento desses pórticos, tema deste trabalho, é necessário inicialmente a determinação das cargas atuantes. Com elas, consegue-se analisar a estrutura e obter a resposta dela, ou seja, determinar tensões, deformações, deslocamentos e outras propriedades dado um carregamento e condição de contorno

inicial em cada parte da estrutura. Analisar o comportamento das estruturas é extremamente relevante devido ao grande interesse de, cada vez mais, projetar estruturas mais leves, esbeltas, resistentes e econômicas, sem que os fatores de segurança sejam prejudicados, tornando os produtos mais competitivos no mercado. Existem inúmeros formas de obter os resultados de uma estrutura, como o uso numérico computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos, por exemplo (SILVA, 2009, p.2).

Portanto, para um modelo com dimensões pré-definidas, é avaliado neste estudo o comportamento estrutural de um pórtico metálico, tendo como base uma formulação estática e linear, quanto ao uso de diferentes combinações de perfis estruturais. Será realizada a análise de três perfis comerciais mais utilizados para a fabricação de pórticos, e o material mais convencional para a produção do mesmo, a fim de obter resultados nos parâmetros peso, resistência mecânica e custo. Para isso, será utilizado como ferramenta de análise o Método dos Elementos Finitos através do uso do *software* ANSYS, e ainda esta análise terá como ferramenta de estudo e referência a norma ABNT NBR 8800/2008.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS

É conhecido que o cálculo usual da estrutura de um pórtico metálico é feito a partir de um tipo de perfil já definido, ou seja, definido pelo o que é culturalmente usado na construção civil. A partir disso é efetuado um pré-dimensionamento baseado em formulações empíricas da literatura para a escolha das dimensões deste perfil (D'ALAMBERT; LIPPI, 2010; D'ALAMBERT, 2012).

Não há uma fundamentação baseado na norma, que rege a elaboração de projetos com estruturas de aço (ABNT NBR 8800/2008), para o uso de um tipo de perfil específico para cada elemento estrutural. A norma é utilizada posteriormente ao pré-dimensionamento do perfil somente para sua verificação.

Devido a isso, o estudo é baseado na verificação numérica (computacional) do desempenho estrutural dos tipos de perfis mais usuais, para uma mesma configuração estrutural.

A importância deste trabalho está em poder fornecer resultados suficientes para escolher qual combinação de perfil é mais viável para o projeto de um pórtico metálico,

de acordo com as variáveis de projeto, sendo elas a resistência mecânica, o peso e o custo de projeto. A resistência mecânica é a variável mais importante para o projeto, já que ela determina quais combinações estão de acordo com a norma. Além disso, alguns projetos implicam em ter leveza ou em ser mais viáveis economicamente. Por isso, após a análise estrutural, foi feita análise com os demais parâmetros, de modo que o projetista possa ter maior possibilidade de escolha de acordo com as variáveis de projeto.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral identificar e selecionar o melhor perfil para um pórtico metálico solicitado a um carregamento inicial. Para isso, é utilizado o Método dos Elementos Finitos, com auxílio do *software* ANSYS, e a norma ABNT NBR 8800/2008.

Visando cumprir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são definidos:

1. Revisar os conceitos relacionados ao Método dos Elementos Finitos e à norma ABNT NBR 8800/2008;
2. Verificar quais são os tipos de perfis, materiais mais utilizados comercialmente e como é determinada a força atuante no pórtico;
3. Aplicar a norma ABNT NBR 8800/2008 para identificação do deslocamento máximo a ser usado como parâmetro de verificação e desenvolver um modelo no *software* ANSYS para obter e analisar a resistência mecânica em termos de deslocamento e tensão para os tipos de perfis adotados;
4. Verificar quais dos perfis são mais adequados estruturalmente para o pórtico, levando em consideração a melhor resistência mecânica, menor peso e menor custo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

2.1.1 Introdução

Para o estudo da mecânica estrutural na engenharia percebe-se que, em geral, as análises são baseadas em estruturas simples onde os métodos analíticos clássicos são aplicáveis, que, segundo Alves Filho (2000), permitem o cálculo de resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus pontos. No entanto, como a maioria das estruturas estudadas na engenharia apresentam formas complexas e condições de carregamento variáveis, o cálculo das estruturas pelos métodos analíticos clássicos se torna inviável. Desse modo, é necessário recorrer a soluções aproximadas para resolver estes problemas de engenharia. A partir disso, surgiram diversos métodos para solucionar problemas reais de engenharia e um dos métodos é o Método dos Elementos Finitos (ALVES FILHO, 2000, p. 3).

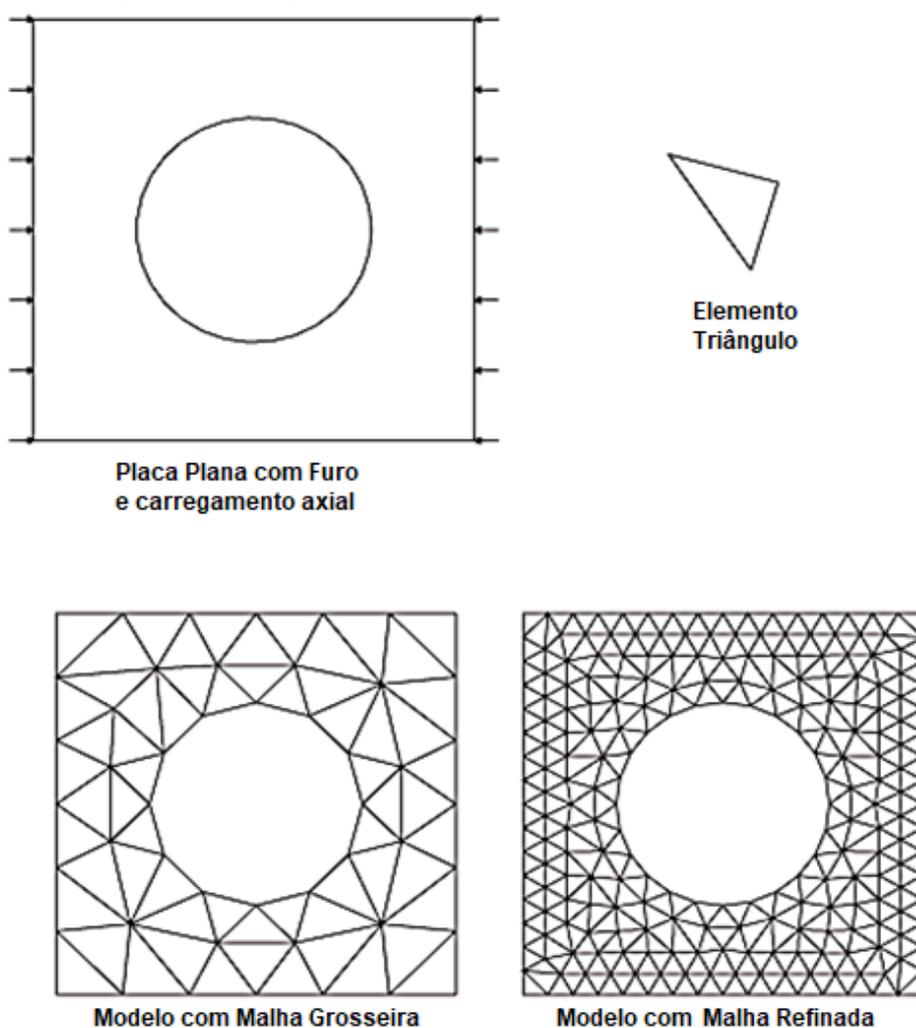
No âmbito da engenharia, o Método dos Elementos Finitos é aplicável em diversas áreas como em problemas de análise de tensão, fluxo de calor, escoamento de fluido e eletromagnetismo através de simulação computacional (FISH; BELYTSCHKO, 2009, p.1).

A ideia básica do MEF é dividir uma estrutura, ou componentes mecânicos ou, de uma forma geral, um corpo contínuo, em um número finito de partes, chama-se também de elementos, que são conectados entre si por pontos discretos, chamados nós. A junção dos diversos elementos através dos nós dá origem a malha. A partir da geração dessa malha, é possível obter uma solução aproximada para cada elemento individual que constitui um corpo contínuo (FISH; BELYTSCHKO, 2009, p.1; ALVES FILHO, 2000, p.11).

Através da Figura 3 pode-se entender melhor, de forma geral, o conceito do Método dos Elementos Finitos. Considerando uma placa plana com um furo central sujeita a um determinado carregamento, deseja-se encontrar as tensões e o deslocamento em um dado ponto. Utilizando o método analítico clássico, o processo se torna inviável e é quase impossível de resolver. A solução do problema se dá através de uma solução aproximada que pode ser obtida por meio do Método dos Elementos Finitos dividindo a estrutura ou o objeto em diversas partes, onde cada

parte é chamada de elemento e cada elemento possui um número de nós. Como pode ser visto no exemplo da Figura 3, foi utilizado o elemento triangular que possui três nós. Pode-se observar que, em geometrias complexas, quanto menor o número de nós, menor a proximidade à solução real. E, quanto maior o número de nós, ou seja, quanto mais refinada a malha, mais próximo à solução real se torna. Isso se observa especialmente na região do furo central da placa plana na Figura 3. Do lado esquerdo inferior da imagem se observa uma malha grosseira onde não há uma definição exata de um furo circular. Desse modo, devido à distorção da geometria, a solução não ficará muito próxima à solução exata. Já no lado direito inferior da imagem, observa-se um número maior de nós e o furo está bem próximo ao formato de um círculo, o que torna a solução mais próxima à solução exata (FISH; BELYTCHKO, 2009).

Figura 3 – Solução aproximada através de malhas pelo MEF.



Fonte: Fish (2009, p.2)

De forma geral, no MEF as estruturas podem ser discretizadas da seguinte forma: por elementos reticulados ou por elementos conectados continuamente. Nos elementos reticulados, como vigas contínuas, pórticos planos, pórticos espaciais, grelhas e treliças, a interação entre os elementos se deve somente nas juntas ou nós, ou seja, as forças entre si ocorrem somente nesses pontos. Já nos elementos estruturais conectados continuamente, como o elemento triângulo ou o elemento quadrilátero, a interação pode ocorrer não apenas através dos nós e sim através de uma parte do elemento em compartilhamento (uma aresta, por exemplo) (ALVES FILHO, 2000, p.12 e 13).

Como este trabalho se trata de um pórtico metálico, e para uma simplificação do estudo, os elementos utilizados serão os reticulados.

2.1.2 Tipos de Análise

É importante ressaltar também os tipos de análise. Estas podem ser estáticas ou dinâmicas e, além disso, podem ser lineares ou não-lineares (SILVA, 2009, p.2).

Na análise estática, uma estrutura sujeita a um dado carregamento não irá se modificar ao longo do tempo. Já na análise dinâmica, a estrutura está sujeita a mudanças ao longo do tempo. As ações sobre uma estrutura são normalmente dinâmicas, sendo consideradas assim forças inerciais referentes às acelerações que cada componente está sujeito. Porém, em muitas situações é aceitável considerar que as ações são aplicadas de maneira suficientemente lenta, tornando as forças inerciais desprezíveis (AZEVEDO, 2003, p.3).

Ao analisar uma estrutura, considera-se, normalmente, que os deslocamentos provenientes das ações exteriores são pequenos comparados com as dimensões dos elementos da estrutura. Nesses casos, se aceita que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, portanto, o estudo é baseado na geometria inicialmente indeformada, caracterizando uma análise linear. Caso contrário a análise passa a ser não linear geométrica (AZEVEDO, 2003, p.3).

Neste trabalho será considerado uma análise estática e linear.

2.1.3 Formulação

O Método dos Elementos Finitos é baseado nas álgebras matricial e variacional. Nas estruturas reticuladas, os elementos unidimensionais (molas, treliças e vigas) são conectados por nós e estes se localizam nas extremidades. As forças externas são aplicadas somente nos nós e o deslocamento é expresso em termos de deslocamentos nodais. Desse modo, a relação geral linear entre todas as forças externas e os deslocamentos nodais pode ser expresso através de notação matricial, verificado na Equação 1 (ALVES FILHO, 2000, p.18):

$$\{F\} = [K] \times \{U\} \quad (1)$$

Sendo que:

$\{F\}$ = Vetor com as cargas nodais;

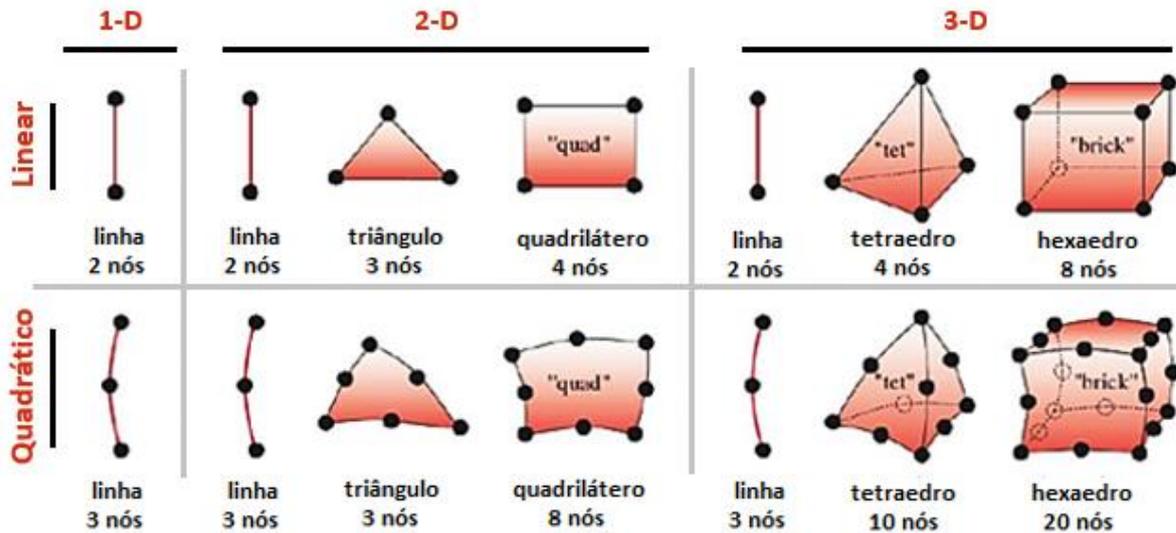
$[K]$ = Matriz rigidez global;

$\{U\}$ = Vetor com os deslocamentos nodais.

2.1.4 Tipos de Elementos

A Figura 4 exemplifica alguns diferentes tipos de elementos. Estes elementos são agrupados em unidimensional, bidimensional e tridimensional. Dentre os tipos de elementos unidimensionais têm-se o elemento mola, o elemento treliça e o elemento viga. Dentre os elementos bidimensionais, pode-se citar o elemento triangular linear, elemento retangular linear, elemento triangular parabólico ou quadrático, elemento retangular parabólico ou quadrático. Por fim, pode-se listar os elementos tridimensionais como o elemento sólido tetraédrico linear, o elemento sólido hexaédrico linear, o elemento sólido tetraédrico parabólico ou quadrático e o elemento sólido hexaédrico parabólico ou quadrático (ALVES FILHO, 2000).

Figura 4 – Tipos de Elementos.



Fonte: Norton (2013, p. 486)

Os diversos tipos de elementos são usados para representar as estruturas reais ou simplificações delas. Como exemplo, os elementos de linha são adequados para modelar estruturas como treliças e vigas com área de seção transversal constante e cada nó pode conter um, dois, três ou seis graus de liberdade (GDL). Um elemento de linha unidimensional possui dois graus de liberdade, como no caso do elemento treliça e do elemento mola. O elemento de linha pode apenas transmitir força ao longo do seu comprimento (unidimensional) e não pode suportar momento nos nós. Um elemento de linha bidimensional tem três GDL por nó e pode representar uma viga bidimensional, com momento e força em duas direções. Um elemento de linha tridimensional possui seis GDL por nó e pode representar um eixo-viga tridimensional com momentos e torques além das forças lineares nas três direções. (NORTON, 2013, p.485).

Os elementos podem ser divididos pela sua ordem, podendo ser linear ou quadrático. Os elementos lineares possuem contornos retos enquanto os elementos quadráticos, ou de alta ordem, possuem contornos curvos (parabólicos). Os elementos quadráticos conseguem representar peças de geometria mais complexas (NORTON, 2013, p. 486).

O grau de liberdade dos elementos está diretamente relacionado à matriz de rigidez correspondente, como pode ser observado na Figura 5. Por exemplo, se o grau

de liberdade de um nó de um certo elemento é igual a dois, como no elemento treliça, então a matriz de rigidez será uma matriz 2x2.

Figura 5 – Matriz de Rigidez de alguns elementos.

Tipo de Elemento	Grau de Liberdade	Matriz de Rigidez
Mola	2	$[k] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$
Barra	2	$[k] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{l} & -\frac{AE}{l} \\ -\frac{AE}{l} & \frac{AE}{l} \end{bmatrix}$
Viga (plano)	4	$[k] = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix}$
Pórtico (plano)	6	$[k] = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & 12b & 6bl & 0 & -12b & 6bl \\ 0 & 6bl & 4bl^2 & 0 & -6bl & 2bl^2 \\ -a & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & -12b & -6bl & 0 & 12b & -6bl \\ 0 & 6bl & 2bl^2 & 0 & -6bl & 4bl^2 \end{bmatrix}$, onde: $a = \frac{EA}{l}$ $b = \frac{EJ}{l^3}$
Eixo	2	$[k] = \begin{bmatrix} \frac{GJ}{l} & -\frac{GJ}{l} \\ -\frac{GJ}{l} & \frac{GJ}{l} \end{bmatrix}$

Fonte: Alves Filho (2000)

No *software* o pórtico metálico foi discretizado por um elemento de viga. No entanto, na prática o pórtico metálico é calculado através de um elemento de pórtico plano. As próximas seções contêm mais detalhes sobre esses dois elementos.

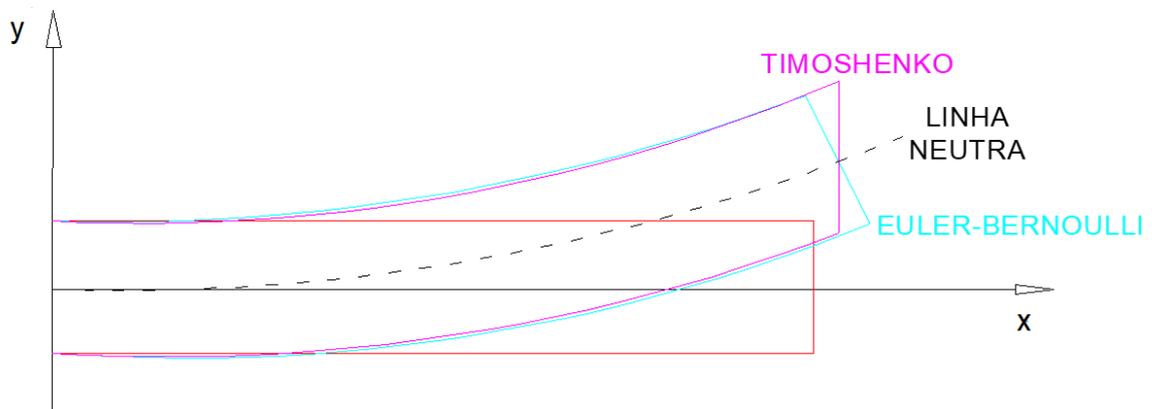
2.1.4.1 Elemento Viga

A viga é definida como um elemento estrutural que possui o seu comprimento muito maior que as outras dimensões transversais. (SILVA, 2014, p.8)

Existem dois modelos para o cálculo de viga: o modelo de Euler-Bernoulli e o modelo de Timoshenko. Na Teoria de Euler-Bernoulli, a formulação do elemento finito

de viga considera que as seções transversais se mantêm planas e normais à linha neutra da viga após a deformação. Deste modo, não se considera o esforço cortante. (AZEVEDO, 2003, p.203). Na teoria de Timoshenko considera-se a deformação devido ao esforço cortante, isso porque após a deformação é considerado que uma seção normal a linha neutra da viga não se mantêm plana. (AZEVEDO, 2003, p.224). Na Figura 6 nota-se a diferença entre os dois modelos.

Figura 6 - Diferença entre os modelos de viga de Timoshenko e de Euler-Bernoulli



Fonte: Os autores.

A diferença entre os dois modelos se torna relevante à medida que a altura da seção transversal se torna maior. Segundo dados do *software* ANSYS, o elemento de viga utilizado (BEAM188) se baseia no modelo de viga de Timoshenko, ou seja, esforços cortantes na seção transversal são considerados (BANDEIRA e GONZALEZ, 2019).

A análise neste trabalho foi realizada utilizando o elemento de viga linear, tridimensional com seis graus de liberdade por nó, sendo três relativos à translação e três relativos à rotação (BEAM 188). Este elemento é utilizado principalmente em problemas não-lineares que envolvem grandes deslocamentos e rotações. Considera também esforço cisalhante constante ao longo da seção transversal. Com o elemento BEAM188 é possível definir uma geometria para a seção transversal diferentemente de modelos de viga mais simples adotados no *software* ANSYS, como o BEAM 3 e o BEAM 4 (BANDEIRA e GONZALEZ, 2019). O elemento BEAM 189, por sua vez, é um elemento similar ao BEAM 188, no entanto, é um elemento quadrático o que não se

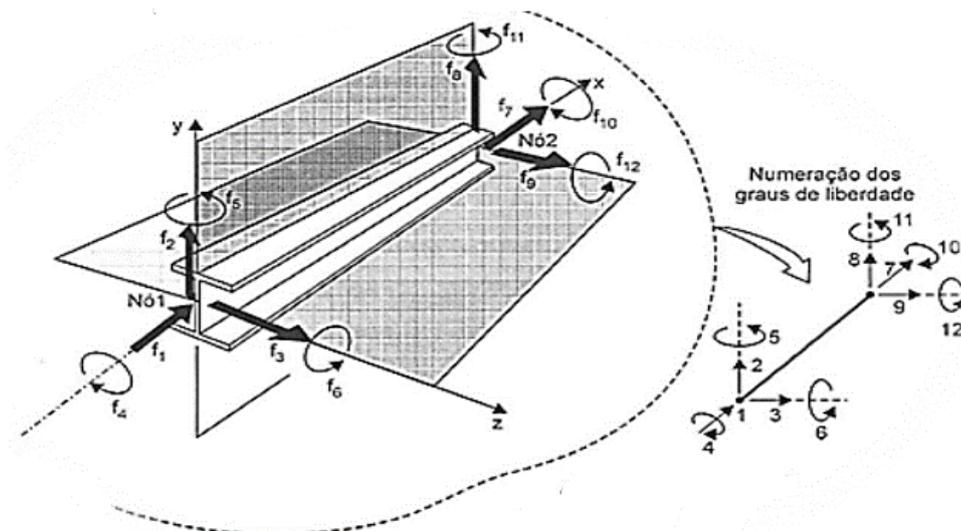
enquadra para esta análise. Por esse motivo, adotou-se o elemento BEAM188. Este elemento possui dois nós, portanto, ao todo, o elemento possui doze graus de liberdade, o que gera uma matriz de rigidez de 12x12, como pode se observar na Equação 2.

$$[k]^e = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12b_z & 0 & 0 & 0 & 6b_zL & 0 & -12b_z & 0 & 0 & 0 & 6b_zL \\ 0 & 0 & 12b_y & 0 & -6b_yL & 0 & 0 & 0 & -12b_y & 0 & -6b_yL & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6b_yL & 0 & 4b_yL^2 & 0 & 0 & 0 & -6b_yL & 0 & 2b_yL^2 & 0 \\ 0 & 6b_zL & 0 & 0 & 0 & 4b_zL^2 & 0 & -6b_zL & 0 & 0 & 0 & 2b_zL^2 \\ -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12b_z & 0 & 0 & 0 & -6b_zL & 0 & 12b_z & 0 & 0 & 0 & -6b_zL \\ 0 & 0 & -12b_y & 0 & -6b_yL & 0 & 0 & 0 & 12b_y & 0 & 4b_yL & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6b_yL & 0 & 2b_yL^2 & 0 & 0 & 0 & 4b_yL & 0 & 4b_yL^2 & 0 \\ 0 & 6b_zL & 0 & 0 & 0 & 2b_zL^2 & 0 & -6b_zL & 0 & 0 & 0 & 4b_zL^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde: $a = \frac{EA}{L}$; $b_z = \frac{EI}{L^3}$; $b_y = \frac{EI}{L^3}$; $t = \frac{GJ}{L}$

O elemento de viga espacial pode ser evidenciado na Figura 7. Há três forças sendo uma em cada eixo (X,Y,Z) e três momentos em torno de cada plano (XY,XZ, YZ).

Figura 7 - Graus de liberdade de uma viga tridimensional.



Fonte: Alves Filho (p.98, 2000)

Este é o elemento aplicado para análise no *software* ANSYS. No entanto, como apresentado no decorrer neste trabalho, a verificação da análise será realizada através do *software* Ftool, e este possui uma análise através de um elemento de pórtico plano. O tópico a seguir trata sobre este elemento.

2.1.4.2 Pórtico plano

O elemento de pórtico plano possui três graus de liberdade por nó, considerando que este agrupa o elemento barra e o elemento viga bidimensional. A matriz de rigidez deste elemento é evidenciada na Equação 3.

$$[K^e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 NORMA ABNT NBR 8800/2008

2.2.1 Introdução

Para a etapa de pós-processamento e validação deste estudo é utilizado como referência alguns itens da norma brasileira ABNT NBR 8800/2008.

A norma ABNT NBR 8800/2008 tem como diretrizes estabelecer requisitos para “projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”. Nesta norma são descritos itens como: Simbologias, Segurança e Estados-limites, Valores de Resistências, Estabilidade e Análise Estrutural, Condições específicas para o dimensionamento dos elementos de aço, análise de Fadiga, Fratura Frágil, Deslocamentos, Vibrações, Requisitos básicos de fabricação, montagem e controle de qualidade, e mais inúmeros outros itens relevantes para um projeto de estruturas de aço e estruturas mistas (NORMA ABNT NBR 8800, 2008).

A partir da norma pode-se obter o deslocamento máximo em uma estrutura para dar início à análise estrutural do pórtico metálico.

2.2.2 Itens da Norma

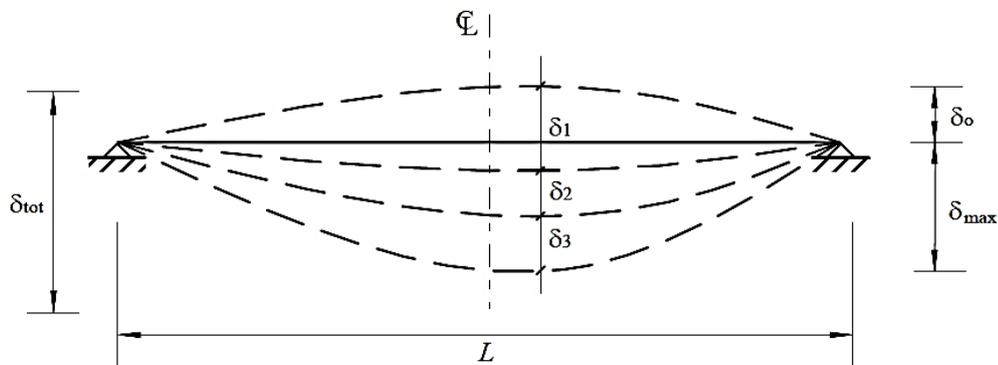
Neste trabalho é utilizado o anexo C da norma que trata dos deslocamentos máximos requeridos para situações usuais nas construções. Segundo a Norma “esses deslocamentos devem ser entendidos como valores práticos a serem utilizados para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos da estrutura” (NORMA ABNT NBR 8800, 2008, p.115).

Em casos de deslocamentos verticais (flechas), a referência é uma viga simplesmente apoiada, indicada na Figura 8, onde:

δ_0 é a contraflecha da viga, δ_1 é o deslocamento devido às ações permanentes, sem efeitos de longa duração, δ_2 é o deslocamento devido aos efeitos de longa duração das ações permanentes (se houver), δ_3 é o deslocamento devido às ações variáveis, incluindo, se houver, os efeitos de longa duração devidos aos valores quase permanentes dessas ações, δ_{max} é o deslocamento máximo da viga no estágio final de carregamento levando-se em conta a contraflecha e δ_{tot} é a soma de δ_1 , δ_2 e δ_3 .” (NORMA ABNT NBR 8800, 2008, p.115).

Para o projeto em questão, a análise do deslocamento máximo (δ_{max}) é primordial para a posterior análise estrutural do pórtico metálico.

Figura 8 - Deslocamentos verticais a serem considerados.



Fonte: Norma ABNT NBR 8800 (2008, p.116)

Para obter o deslocamento máximo é utilizado a equação referente ao item “Vigas de Cobertura” da Tabela C.1 descrita no anexo C da norma, que consiste na Equação 2.

$$\delta = \frac{L}{250} \quad (4)$$

Onde:

L = vão teórico entre os apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço.

2 METODOLOGIA

2.3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Este projeto é desenvolvido e avaliado através dos seguintes passos metodológicos conforme descritos a seguir:

a) Revisão bibliográfica:

O primeiro passo do projeto foi revisar os principais temas que englobam o contexto do trabalho. São eles: o Método dos Elementos Finitos (MEF), a sua formulação, os tipos de elementos, e identificar os itens necessários da norma ABNT NBR 8800/2008 para utilização neste estudo.

b) Escolha dos perfis comerciais:

O segundo passo foi identificar 3 perfis de vigas comerciais e seus diferentes arranjos estruturais para serem utilizados no pórtico metálico em estudo.

Neste trabalho, entende-se como arranjo estrutural, a variação, ou não, dos tipos de perfis nas colunas e nas vigas de cobertura, que compõe os pórticos metálicos.

c) Pré-dimensionamento do pórtico:

Com o auxílio do ábaco para construção de pórticos, pré-dimensionar o pórtico, para ter como base os parâmetros para a escolha dos perfis comerciais, achados em catálogos;

d) Identificação do material:

Identificar os materiais mais comuns usados na fabricação dos pórticos metálicos, e possivelmente “testar” mais algum possível material que não é usualmente utilizado na fabricação dessas estruturas. Através da escolha do material é possível determinar o limite de escoamento do material que, posteriormente neste trabalho, determina qual arranjo estrutural está dentro do limite de escoamento do material.

e) Determinação das forças atuantes no pórtico

Determinar as forças atuantes no pórtico a partir de uma dada combinação de carregamento através do ábaco para construção de pórticos bem como da norma ABNT NBR 6123.

f) Aplicação do Método dos Elementos Finitos, utilizando o *software* ANSYS

Com o auxílio do *software* comercial ANSYS, foram obtidas as características para cada perfil como a resistência mecânica devido à tensão e ao deslocamento.

g) Obtenção do deslocamento máximo

Com o auxílio da norma ABNT NBR 8800/2008 previamente estudada, foi avaliado o deslocamento máximo a ser utilizado para os perfis das vigas, que foi utilizado como parâmetro de verificação dos possíveis arranjos estruturais.

h) Verificação dos resultados com a ferramenta computacional Ftool

Comparar resultados obtidos na análise do modelo do ANSYS através do *software* Ftool como forma de verificação dos resultados.

i) Análise e comparação dos resultados

Foi realizado a análise da resistência mecânica através das tensões diretas e combinadas e através do deslocamento máximo de cada arranjo estrutural. E a partir dos resultados obtidos foi identificado qual arranjo estrutural é mais adequado tendo em vista a melhora da resistência mecânica.

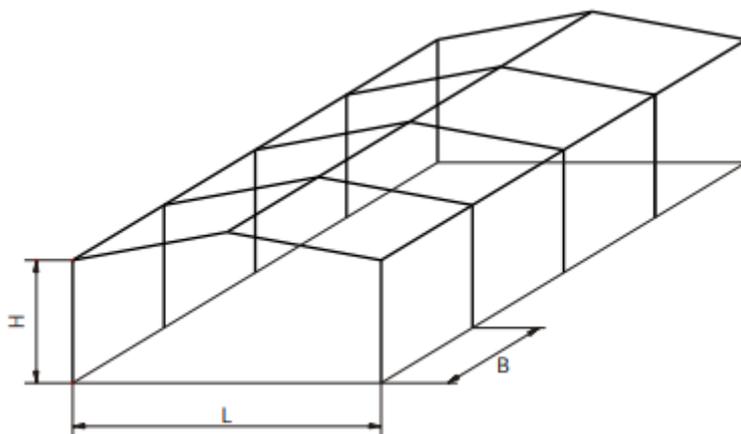
j) Análise do peso e custo de cada arranjo estrutural.

Comparar o peso dos arranjos estruturais através da massa linear e comparar o custo através do preço obtido pelos fornecedores e analisar qual arranjo é mais vantajoso para cada parâmetro.

3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO PÓRTICO

Como visto anteriormente, os pórticos simples de alma cheia têm como modelo um vão livre de 15 a 45 metros, e altura de 5 a 12 metros. Por isso, foram escolhidos valores nessa faixa, respeitando a inclinação da cobertura dentro de 5° e 20° . E em seguida, definiu-se o espaçamento (6 a 12 metros) entre os pórticos para se obter um pórtico próximo da realidade para gerar resultados plausíveis. As dimensões do pórtico constam na Figura 9 (Gerdau¹).

Figura 9 - Dimensões principais de um pórtico.



Fonte: D'Alambert¹, 2012.

Onde H é a altura, L é o vão livre, e B o espaçamento entre os pórticos.

Foi definido altura de 6 metros, o vão livre de 15 metros, a inclinação da cobertura de 15° e o espaçamento entre os pórticos de 6 metros. A dimensão do espaçamento é utilizada mais adiante neste trabalho no item 4.5 para o cálculo da área do telhado.

3.1 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

O dimensionamento de vigas biapoiadas sem balanço é dado de acordo com a carga podendo ser: pequena, média ou grande. Pode-se considerar pequenas cargas se há laje apoiada em apenas um lado da viga e quando não há alvenaria. Carga média é quando há presença de alvenaria e a laje está apoiada em ambos os lados e

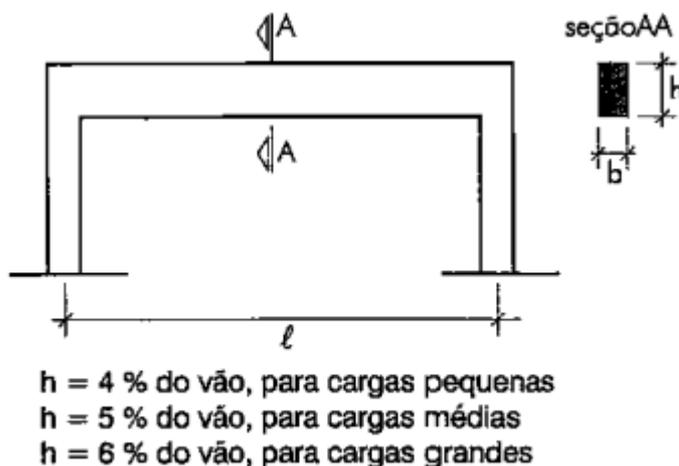
carga grande é quando além de alvenaria e laje apoiada em ambos os lados, há a presença de cargas de outras vigas apoiada sobre ela.

A dimensão da altura do perfil (h) para carga pequena deve ser 4% do comprimento da viga (l), enquanto para carga média deve ser 5% do comprimento e para carga grande 6% do comprimento.

A porcentagem adotada para a viga de cobertura foi de 4% pois o valor obtido contempla as medidas das alturas dos perfis nos catálogos.

A largura da viga deve variar de 40 a 60% do valor da altura do perfil.

Figura 10 - Dimensão do Perfil para Vigas Biapoiadas sem balanço.

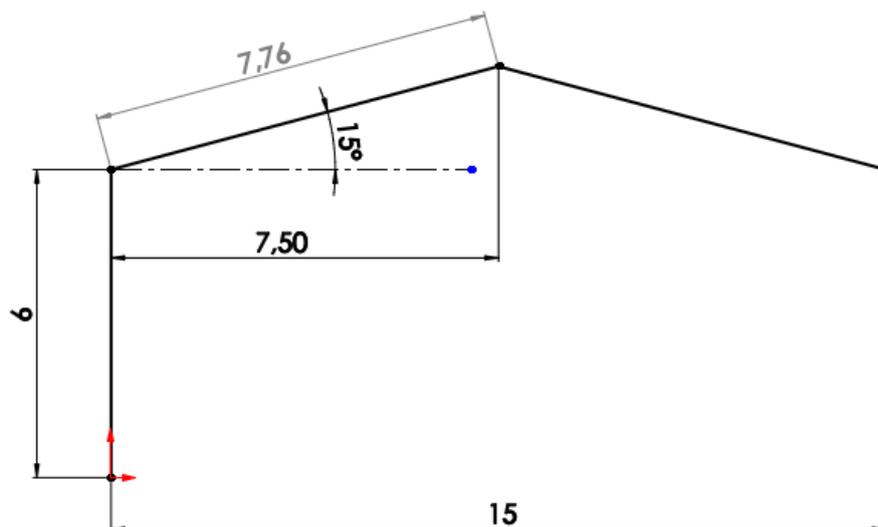


Fonte: Rebello (2007, p.77)

Após determinado o valor da altura do perfil foi possível consultar o catálogo da Gerdau para achar as demais dimensões, sendo que varia para cada perfil. O valor da largura do perfil foi determinado também no catálogo pois, desse modo, os valores ficam compatíveis com a realidade.

Como o vão do pórtico a ser analisado possui 15 metros, é possível encontrar o comprimento referente a cada viga de cobertura do pórtico com uma relação simples de trigonometria, como consta na Figura 11.

Figura 11 - Dimensões do pórtico estudado (dimensões em metros).



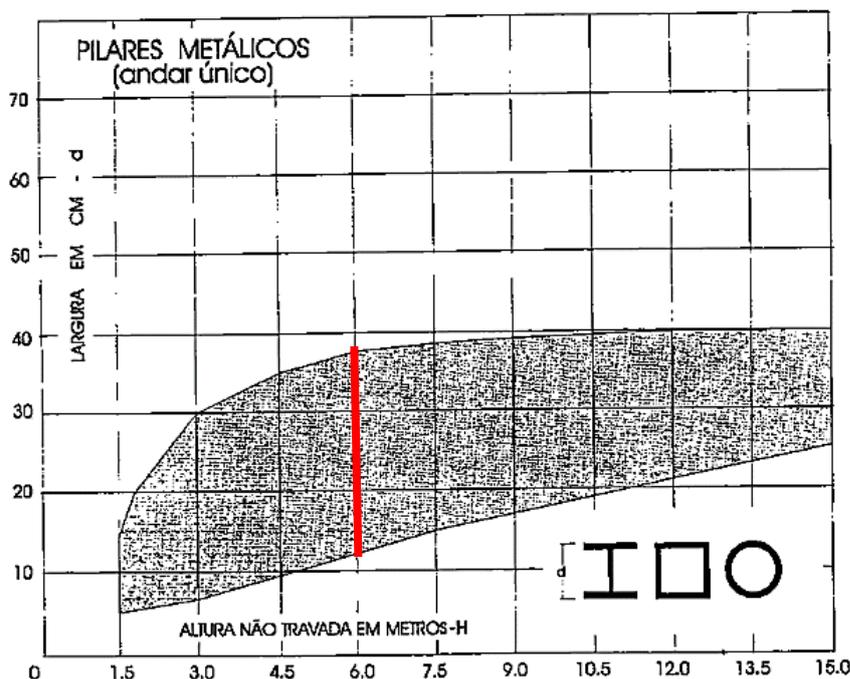
Fonte: Os autores.

Desse modo, como o valor do comprimento de cada viga foi de 7,76 metros, determinou-se assim o valor da altura do perfil (4% do comprimento), que ficou em torno de 31,04 cm. Conhecida a altura do perfil foi possível estimar o valor da largura do perfil da viga, que é de 40 a 60% da altura. Com isso, obteve-se a largura do perfil de 12,42~18,62 cm. O perfil foi escolhido tendo como parâmetro o valor da altura, o valor da largura foi utilizado somente como base para a escolha do melhor perfil que mais se aproxima entre as opções no catálogo comercial.

3.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PILARES

Os pilares devem ser pré-dimensionados de acordo com o gráfico que consta na Figura 12. O eixo X se refere à altura do pilar e o eixo Y se refere à altura do perfil. A região sombreada se refere à zona de segurança para o pré-dimensionamento.

Figura 12 - Gráfico para flambagem.



Fonte: Rebello (2007, p.90)

Como os pilares possuem uma altura de 6 metros, a região de segurança para a altura dos perfis fica entre aproximadamente 13-37 cm.

3.3 MATERIAL DOS PERFIS

Segundo os catálogos utilizados, o material utilizado na fabricação de perfis é o aço estrutural, podendo este ser ASME A36 e ASME A572. O limite de escoamento do ASME A36 é de 195 a 259 MPa, resistência à tração está entre 400 e 550 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa, enquanto o ASME A572 possui um limite de escoamento de 290 a 345 MPa e resistência à tração de 450 MPa. O aço A36 possui média resistência, é um aço leve, possui baixa concentração de carbono (em torno de 0,28%) e, por ser simples quimicamente, possui baixo custo. Por sua vez, o aço A572 é de alta resistência e baixa liga.

Seguindo o padrão para perfis, o aço A36 é o mais adequado para aplicação de perfis em estruturas metálicas e também devido ao seu menor custo.

Os dados do aço A36 constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do Aço A36.

Composição Química do aço A36 (%)	
C máximo	0,28
Mn	0,6 – 0,9
P máximo	0,04
S máximo	0,05
Si máximo	0,4
Cu mínimo	0,2
Propriedades Mecânicas	
Módulo de elasticidade	200 GPa
Limite de Escoamento	250 MPa
Limite de Ruptura	400 – 550 MPa
Alongamento máximo	23%

Fonte: Os autores, tendo como base Allgayer

3.4 DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS

Antes da análise de dados, escolheu-se os três perfis, alguns listados no capítulo 1, mais adequados para a construção de pórticos. Como o perfil L é mais utilizado para cantoneiras e não é uma geometria simétrica, este foi descartado para a execução da análise de dados. Desse modo, os perfis a serem analisados foram os perfis I, U e o retangular.

O pórtico analisado contém duas combinações de perfis: um tipo de perfil nos pilares e outro na viga de cobertura, podendo ambos serem iguais. Ou seja, por exemplo, pode haver uma combinação de um perfil I no pilar com um perfil U na cobertura, ou o contrário, assim como também ambos podem ser U ou I.

Como foram escolhidos três perfis e realizada uma combinação de dois elementos, sendo que a ordem dos elementos importa, logo, obteve-se nove combinações de perfis. As combinações são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Combinação de perfis.

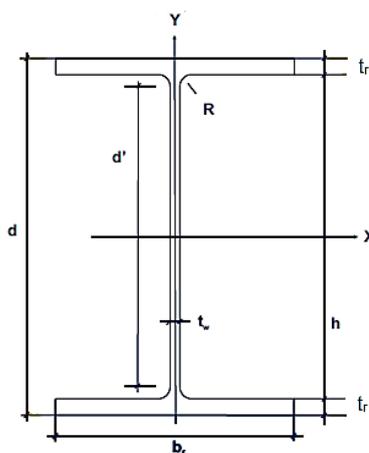
	Viga	Pilar
Combinação 1	I	I
Combinação 2	I	C
Combinação 3	I	Retangular
Combinação 4	C	C
Combinação 5	C	I
Combinação 6	C	Retangular
Combinação 7	Retangular	Retangular
Combinação 8	Retangular	I
Combinação 9	Retangular	C

Fonte: Os autores.

3.4.1 Dimensionamento do perfil I

As dimensões correspondentes ao perfil I podem ser observadas na Figura 13.

Figura 13 - Medidas perfil I.



Fonte: Os autores, tendo como referência Gerdau² (p.2)

A medida mais próxima achada para altura calculada do perfil para as vigas foi de 313 mm. Assim, as demais medidas constam na Figura 14.

Figura 14 - Perfil I para a cobertura.

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm
				t _w mm	t _f mm		
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271

Fonte: Os autores, tendo como referência Gerdau² (p.2)

O valor para a altura do perfil a ser utilizada nos pilares abrange uma faixa grande. Dessa maneira, foi adotado o valor mediano e, assim, o valor mais próximo foi de 25,7 cm. As demais medidas podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - Perfil I para os pilares.

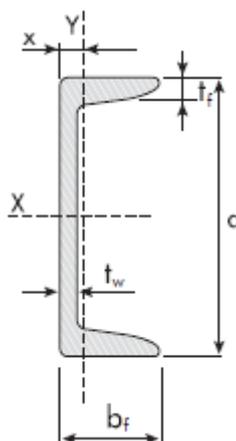
BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm
				t _w mm	t _f mm		
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220

Fonte: Os autores, tendo como referência Gerdau² (p.2)

3.4.2 Dimensionamento do perfil C

A Figura 16 representa as medidas utilizadas para análise no *software* para o perfil C.

Figura 16 - Medidas perfil C.



Fonte: Fonte: Gerdau¹ (p.2)

A altura obtida para o perfil das vigas foi de 30,5 cm e as demais medidas constam na Figura 17.

Figura 17- Perfil C para vigas.

Bitola	Peso	ALMA		ABA	
pol	Nominal kg/m	d mm	t _w mm	b _r mm	t _r mm
12"	30,80	305,00	7,20	74,00	12,70
	37,00		9,80	77,00	12,70

Fonte: Os autores, tendo como referência Gerdau¹ (p.2)

Como foi adotado o valor mediano do gráfico da Figura 12, o valor mais próximo para o perfil C dos pilares foi de 25,4 cm e as demais medidas constam na Figura 18.

Figura 18 - Perfil C para pilares.

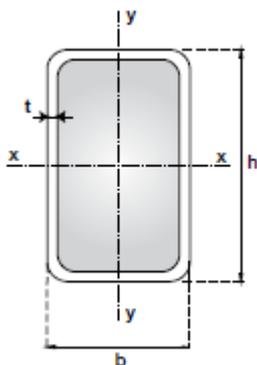
Bitola	Peso	ALMA		ABA	
pol	Nominal kg/m	d mm	t _w mm	b _r mm	t _r mm
10"	22,77	254,00	6,10	68,04	11,10
	29,76		9,63	69,57	11,10

Fonte: Os autores, tendo como referência Gerdau¹ (p.2)

3.4.3 Dimensionamento do perfil Retangular

Na Figura 19 constam as dimensões do perfil retangular.

Figura 19 - Dimensões do perfil retangular.



Fonte: Vallourec (p.33)

O dimensionamento dos perfis retangulares foi retirado do catálogo Vallourec e as dimensões adotadas para as vigas constam na Figura 20. Foi adotada a espessura de 7,1 mm.

Figura 20 - Perfil retangular para vigas.

Dimen- sões Externas	Espes- sura da Parede	Massa por Uni- dade de Comp.
h x b (mm)	t (mm)	m (kg/m)
300 x 150	6,4*	42,1
	7,1*	46,6
	8,0*	52,3
	8,8	57,4
	10,0	64,9
	11,0	71,1
	12,5	80,3
	14,2	90,7
	16,0	101

Fonte: Os autores, tendo como referência Vallourec (p.47)

As medidas adotadas para o pilar foram baseadas nos dados anteriores, sendo a altura de 25 cm. Como a largura não foi especificada, foi adotado um valor igual ao adotado para a viga. As medidas podem ser observadas na Figura 21.

Figura 21 - Perfil retangular para os pilares.

Dimen- sões Externas	Espes- sura da Parede	Massa por Uni- dade de Comp.
h x b (mm)	t (mm)	m (kg/m)
250 x 150	6,4*	37,6
	7,1*	41,6
	8,0*	46,7
	8,8	51,2
	10,0	57,8
	11,0	63,3
	12,5	71,5
	14,2	80,6
	16,0	90,2

Fonte: Os autores, tendo como referência Vallourec (p.45)

3.5 DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS ATUANTES NO PÓRTICO

Apesar da análise deste trabalho ser comparativa, é importante determinar a força atuante no pórtico já que isso aproxima para um caso real de engenharia.

Primeiramente, foi necessário arbitrar a quantidade de pórticos para a análise pois apenas desta maneira foi possível chegar a um valor plausível de força sobre um único pórtico, já que é necessário achar a força de acordo com a área. Desse modo, foi levantada a hipótese de analisar 4 pórticos, como o da Figura 11. As medidas de cada pórtico constam na introdução do item 4.

Com essas condições estabelecidas, e consultando o ábaco para construção de pórticos metálicos, considerou-se que as forças atuantes no pórtico foram devido a ações permanentes e ações variáveis (D'ALAMBERT¹, 2012, p.28). A primeira se refere ao próprio peso da estrutura e a segunda se refere a ações devido ao vento e devido à sobrecarga. Não foi considerado carregamento devido à sobrecarga pois não se aplica ao caso de estudo deste trabalho. Desse modo, a combinação de carregamento escolhida para o dimensionamento de cálculo estrutural foi:

$$1,0 \times \text{ações permanentes} + 1,4 \times \text{ações devido ao vento} \quad (5)$$

A seguir é abordado como foi dimensionada a força devido ao vento e devido ao peso das telhas. Por fim, utilizando a equação 5 é possível determinar o carregamento necessário para um único pórtico.

3.5.1 Força devido ao vento

O cálculo da força exercida pelo vento foi baseado na norma NBR6123, que se refere à força devido ao vento em edificações. O item 7.2 da norma especifica a força exercida pelo vento na estrutura na direção vertical (F_y) e horizontal (F_x) de acordo com o perfil utilizado. A partir das Equações 6 e 7 pôde-se chegar a um valor para F_x e F_y :

$$F_x = C_x \times q \times k \times I \times d \quad (6)$$

$$F_y = C_y \times q \times k \times I \times d \quad (7)$$

Onde q é a pressão dinâmica, k é o fator de redução, l é o comprimento da barra e d é a largura da barra.

Os valores de C_x e C_y foram retirados da Tabela 12 da norma e constam nas Figuras 22 e 23. Os valores considerados são aqueles relativos à disposição de 90° da configuração inicial.

Figura 22 - Valores de C_x e C_y para o perfil I.

α	C_x	C_y
0°	+2,05	0
45°	+1,95	+0,6
90°	+0,5	+0,9
135°	-	-
180°	-	-

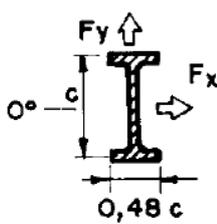


Diagrama de um perfil I com uma força vertical F_y atuando para cima no topo e uma força horizontal F_x atuando para a direita no lado direito. O centro de gravidade está a uma distância c do topo e $0,48c$ do lado direito.

Fonte: Os autores, tendo como base a Norma ABNT NBR 6123.

Figura 23 - Valores de C_x e C_y para o perfil C.

α	C_x	C_y
0°	+2,5	0
45°	+1,85	+0,6
90°	0	+0,6
135°	-1,6	+0,4
180°	-1,8	0

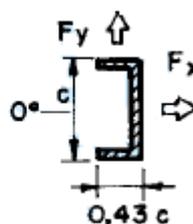


Diagrama de um perfil C com uma força vertical F_y atuando para cima no topo e uma força horizontal F_x atuando para a direita no lado direito. O centro de gravidade está a uma distância c do topo e $0,43c$ do lado direito.

Fonte: Os autores, tendo como base a Norma ABNT NBR 6123.

O valor de q é dado através da Equação 8.

$$q = 0,613 \times V_k \quad (8)$$

Onde V_k é a velocidade característica do vento. E esta é encontrada através da Equação 9.

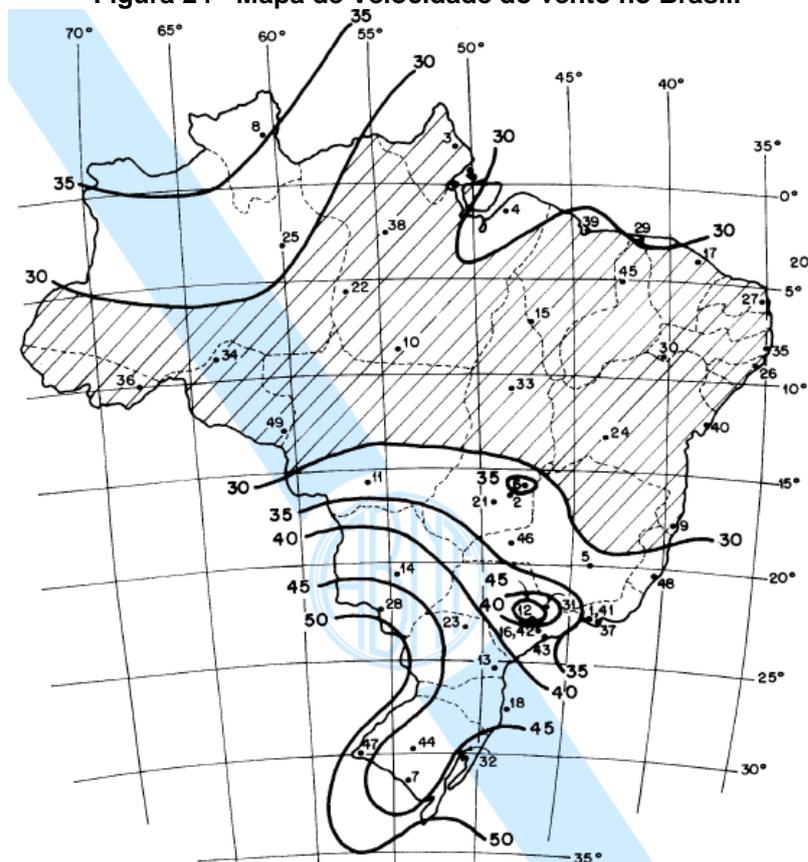
$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (9)$$

Sendo:

- V_0 é a velocidade básica do vento na região onde será realizada a construção;
- S_1 é o fator topográfico;
- S_2 engloba a rugosidade do terreno e a dimensão da edificação;
- S_3 é o fator estatístico.

A velocidade do vento na região de Curitiba oscila entre 40 e 45 m/s como pode se observar na Figura 24. Foi adotado o valor de S_1 igual a 1 pois se considerou que o terreno é plano ou pouco acidentado. O fator S_2 ficou com valor de 1,35 considerando que o pórtico pertence à classe A (maior dimensão tanto horizontal como vertical é inferior a 20 metros) e que a rugosidade do terreno se encontra na categoria IV (áreas industriais onde construções são em torno de 10 metros de altura), como se observa nas Figuras 25 e 26. Por fim, o fator S_3 ficou no valor de 0,95 já que o projeto se enquadra no grupo 3 como se observa na Figura 27.

Figura 24 - Mapa de Velocidade do vento no Brasil.



Fonte: Norma ABNT NBR 6123 (1988, p.6)

Figura 25 - Definição de z_q .

Categoria	z_q (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: Norma ABNT NBR 6123 (1988, p.9)

Figura 26- Fator S₂.

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Fonte: Norma ABNT NBR 6123 (1988, p.10)

Figura 27- Fator S₃.

Grupo	Descrição	S ₃
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: Norma ABNT NBR 6123 (2008, p.10)

O fator de redução (K) foi encontrado na Tabela 11 da norma e este consta na Figura 28.

Figura 28 - Fator de Redução.

l/c ou l/d	2	5	10	20	40	50	100	∞
Barras prismáticas de seção circular em regime subcrítico ($Re < 4,2 \cdot 10^5$)	0,58	0,62	0,68	0,74	0,82	0,87	0,98	1,0
Barras prismáticas de seção circular em regime acima do crítico ($Re \geq 4,2 \cdot 10^5$)	0,80	0,80	0,82	0,90	0,98	0,99	1,0	1,0
Barras prismáticas de faces planas	0,62	0,66	0,69	0,81	0,87	0,90	0,95	1,0

Fonte: Norma ABNT NBR 6123 (1988, p.25)

l corresponde ao comprimento da barra e d corresponde à altura do perfil ou à largura da barra. Como a relação não gera um valor exato, é necessário interpolar.

Depois de encontradas todas as variáveis necessárias, calculou-se o valor de F_x e F_y . Como o carregamento, nesta análise, é composto por forças na direção vertical (y), a composição da força do vento que importa para esta análise é a força na direção vertical. Desse modo, F_x é desconsiderado na análise. Assim, o valor encontrado para F_y foi de 3620 N.

3.5.2 Força devido a ações permanentes

A força devido a ações permanentes foi determinada a partir do peso por área das telhas. Sabendo a distância entre pórticos (6 metros) e determinando o número de pórticos (4 pórticos), foi possível achar a área abrangente pelas telhas e, desse modo, calcular o peso causado pelas telhas. O peso devido às terças e tirantes e devido aos contraventamentos foi desconsiderado. Na Figura 29 pode-se observar o peso por área de cada elemento presente na construção do pórtico.

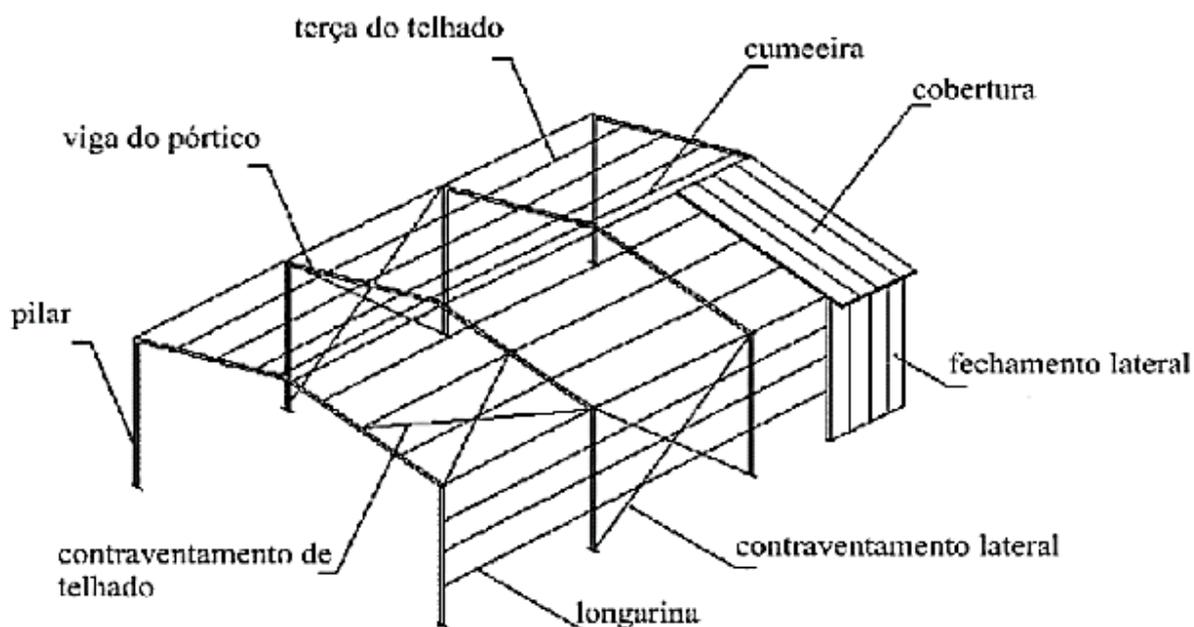
Figura 29 - Peso estimado para elementos presentes no pórtico.

Pórtico	Peso Estimado
Terças e tirantes	0,05 KN/m ² (5 kgf/m ²)
Contraventamentos	0,05 KN/m ² (5 kgf/m ²)
Telhas	0,06 a 0,12 KN/m ² (6 a 12kgf/m ²)

Fonte: D'Alembert (2012, p.27)

De forma a buscar um melhor entendimento de como é composta a estrutura do pórtico, na Figura 30 é possível visualizar a nomenclatura de cada elemento.

Figura 30 - Elementos que compõem o pórtico.



Fonte: Molina; Bertolino Junior (p.178, 2008)

No cálculo foi desconsiderado o peso da viga de cobertura, assim, na análise realizada no *software* o peso da viga é desconsiderado. Desse modo, foi utilizado o valor da força obtido apenas pelo peso das telhas e pela força causada pelo vento, visto que, para uma análise comparativa é mais interessante utilizar um valor fixo de força sabendo que a massa linear para cada tipo de perfil é diferente.

3.5.3 Resultado da força utilizada para a análise

Depois de achado um valor aproximado para a força devido a ações permanentes e força devido ao vento, e, considerando a combinação de carregamento adotada na Equação 5, o somatório de forças fica em torno de 13500 N, como consta na Tabela 3, sendo um resultado compatível com a realidade. Por questões de segurança, já que não foi calculado o peso dos contraventamentos e das terças, foi utilizado arbitrariamente um valor 33% acima do valor encontrado e, desse modo, a força obtida foi de 17743,26 N. Para maior praticidade de análise, utilizou-se um valor redondo acima. Desse modo, foi adotado o valor de **18000 N** para base de análise do pórtico.

Tabela 3 - Cálculo de força, realizado em planilha do Excel.

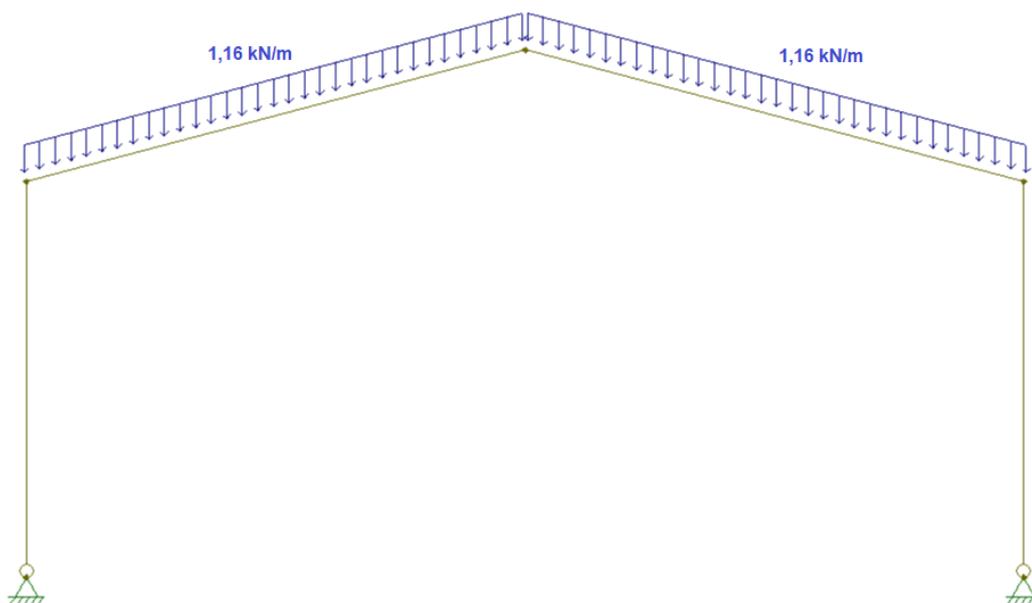
Área telhado (m ²)	275,76
Força total telhas (N)	33091,2
Força terças (N)	-
Força contraventamentos (N)	-
Força vento (N)	3620
Força telhas em um único pórtico (N)	8272,8
Força telha + força vento (N) (combinação de carregamento)	13340,8
Força total (N)	17743,26
(1,33% *(força telha+força vento))	

Fonte: Os autores.

3.5.4 Distribuição do carregamento no pórtico e condições de contorno

O carregamento foi distribuído ao longo das vigas de cobertura, como pode ser verificado na Figura 31. Desse modo, o carregamento distribuído ficou em torno de 1,16 kN/m sabendo que o força total atuante no pórtico foi de 18000 N.

Figura 31 – Carregamento ao longo das vigas de cobertura.



Fonte: Os autores.

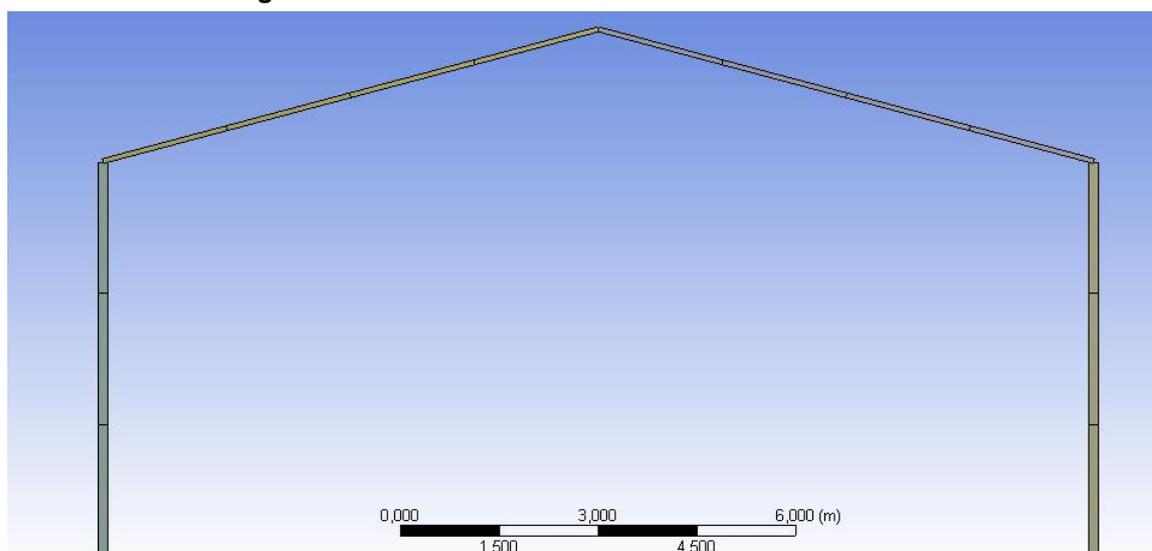
Além do mais é importante ressaltar que o pórtico possui dois apoios fixos que também pode ser verificado na Figura 31.

3.6 MALHA OBTIDA NO MODELO UTILIZADO NA ANÁLISE

Na Figura 32 é possível observar a composição da malha do modelo desenvolvido no ANSYS.

Como se pode observar cada viga é composta por quatro vigas do elemento BEAM 188 e cada pilar por três vigas do elemento BEAM 188. Portanto, o pórtico é composto por um total de 14 vigas do elemento BEAM 188.

Figura 32 – Modelo do ANSYS contendo a malha obtida



Fonte: Os autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Resistência mecânica

Os resultados obtidos no modelo do ANSYS podem ser verificados nas Tabelas de 4 a 12. As tabelas 4 a 6 mantêm como padrão a viga de perfil I. Já nas tabelas de 7 a 9, a viga de perfil C se mantém padrão e nas tabelas de 10 a 12 a viga de perfil retangular se mantém como padrão.

- Viga do tipo I

Tabela 4 - Resultado da combinação viga e pilar do tipo I.

F = 18000N	I viga e I pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta ¹ (MPa)	2,8312	0,55193
Tensão combinada ² máxima (MPa)	368,44	26,218
Tensão combinada mínima (MPa)	362,77	24,597
Deslocamento (mm)	214,03	0

Fonte: Os autores.

Tabela 5 - Resultado da combinação viga I e pilar C.

F=18000N	I viga e C pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	3,1249	0,50302
Tensão combinada máxima (MPa)	392,85	16,585
Tensão combinada mínima (MPa)	386,6	10,335
Deslocamento (mm)	236,76	0

Fonte: Os autores.

1 Tensão direta é a tensão axial gerada no pilar podendo ser de compressão ou de tração. No caso desta análise, a tensão é de compressão. O termo tensão direta está associado à flambagem.

2 Tensão combinada é a combinação da tensão normal e da tensão devido ao momento fletor em um dado elemento.

Tabela 6 - Resultado da combinação viga I e pilar retangular.

F=18000N	I viga e retangular pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	1,933	0,9301
Tensão combinada máxima (MPa)	162,14	18,167
Tensão combinada mínima (MPa)	159,66	14,302
Deslocamento (mm)	70,564	0

Fonte: Os autores.

- Viga do tipo C

Tabela 7 - Resultado da combinação viga e pilar do tipo C.

F = 18000N	C viga e C pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	3,1249	1,1192
Tensão combinada máxima (MPa)	606,18	24,79
Tensão combinada mínima (MPa)	599,93	25,968
Deslocamento (mm)	510,87	0

Fonte: Os autores.

Tabela 8 - Resultado da combinação viga C e pilar I.

F=18000N	C viga e I pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	2,8312	1,1651
Tensão combinada máxima (MPa)	531,38	30,726
Tensão combinada mínima (MPa)	525,72	53,756
Deslocamento (mm)	458,46	0

Fonte: Os autores.

Tabela 9 - Resultado da combinação viga C e pilar retangular.

F=18000N	C viga e retangular pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	2,2239	1,7751
Tensão combinada máxima (MPa)	160,67	10,029
Tensão combinada mínima (MPa)	433,68	6,163
Deslocamento (mm)	208,32	0

Fonte: Os autores.

- Viga do tipo retangular

Tabela 10 - Resultado da combinação viga e pilar do tipo retangular.

F = 18000N	viga retangular e pilar retangular	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	1,933	0,72638
Tensão combinada máxima (MPa)	65,289	9,3893
Tensão combinada mínima (MPa)	61,393	6,5249
Deslocamento (mm)	37,196	0

Fonte: Os autores.

Tabela 11 - Resultado da combinação viga retangular e pilar C.

F=18000N	Viga retangular e Cpilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	3,1249	0,26476
Tensão combinada máxima (MPa)	210,82	9,7543
Tensão combinada mínima (MPa)	204,57	3,5045
Deslocamento (mm)	116,72	0

Fonte: Os autores.

Tabela 12 - Resultado da combinação viga retangular e pilar I.

F=18000N	Viga retangular e I pilar	
	Máximo	Mínimo
Tensão direta (MPa)	2,8312	0,30268
Tensão combinada máxima (MPa)	209,57	18,906
Tensão combinada mínima (MPa)	203,91	14,619
Deslocamento (mm)	109,89	0

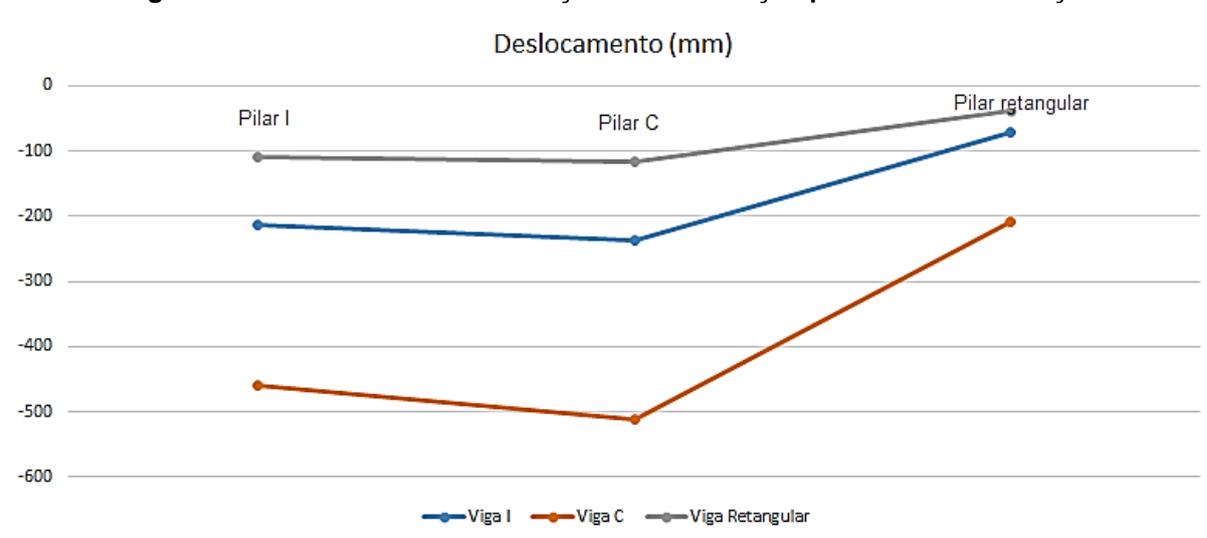
Fonte: Os autores.

Como forma de melhor visualização, os gráficos das Figuras 33 a 41 contêm as variações quanto ao deslocamento, tensão direta e tensões combinadas nas diferentes combinações.

É possível observar que algumas combinações possuem tensão muito elevada que ultrapassa o limite de escoamento do material, que é de 200 MPa, e, portanto, já não são adequadas para uso estrutural. Isso pode ser melhor observado a seguir neste trabalho através dos gráficos.

4.1.1.1 Deslocamento

Figura 33 - Gráfico contendo variação da deformação para cada combinação.

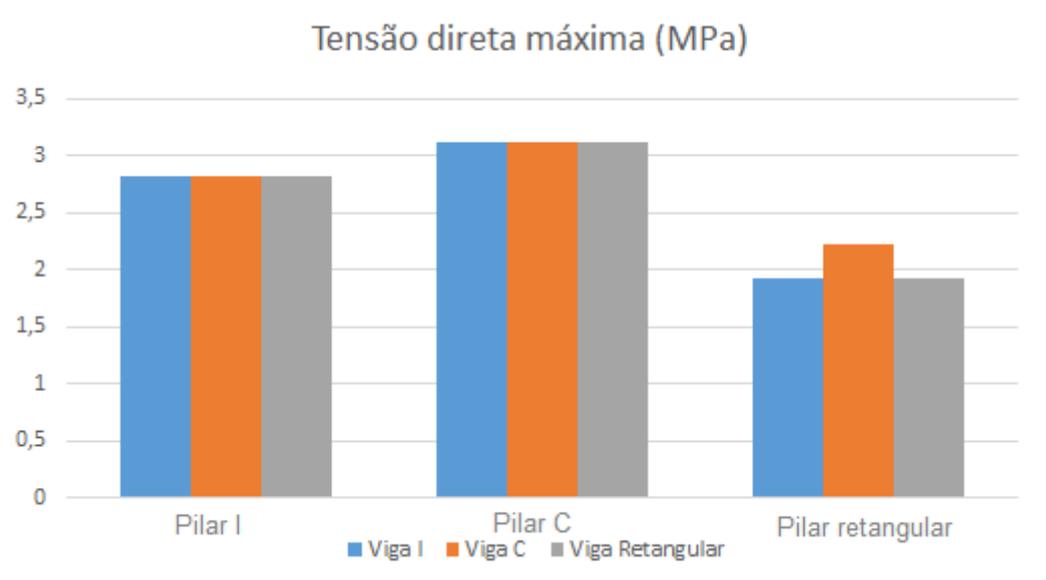


Fonte: Os autores.

Quanto ao deslocamento, a viga de perfil retangular em relação às demais é a que menos deforma com a aplicação da carga, sendo a combinação viga e pilar retangular a mais otimizada de todas as combinações. De modo geral, como pode ser visualizado, quando utilizado o pilar de perfil retangular, reduz drasticamente o deslocamento máximo da estrutura.

4.1.1.2 Tensão direta

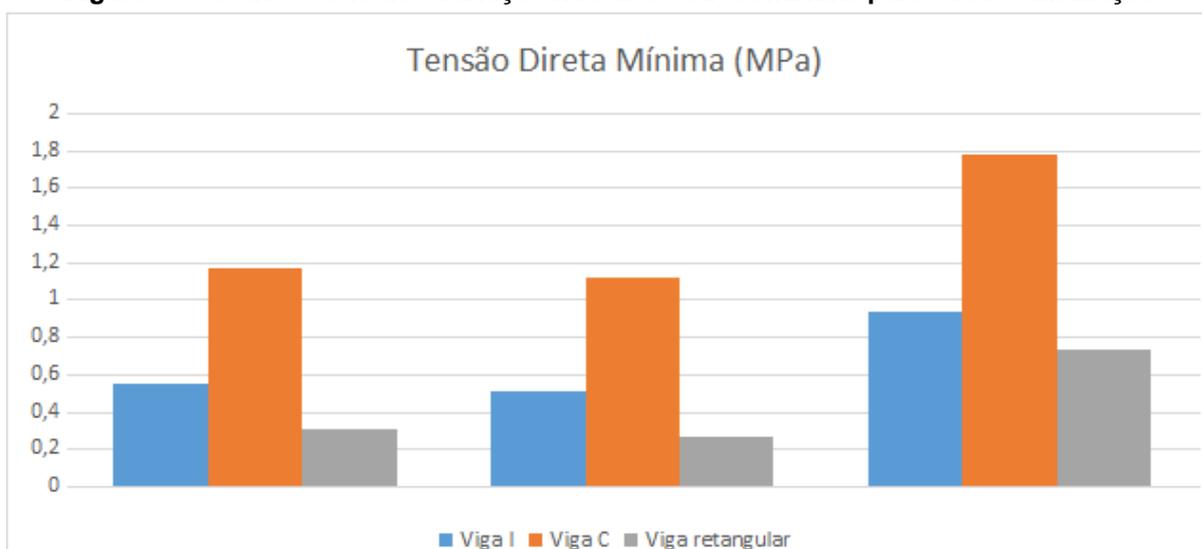
Figura 34 - Gráfico contendo variação na tensão direta máxima para cada combinação.



Fonte: Os autores.

É possível perceber no gráfico da Figura 34 que as tensões máximas são similares para os pilares de um mesmo tipo de perfil, com exceção da viga C que se diferencia quanto ao pilar retangular. Percebe-se que o pilar de perfil C é que possui maior tensão direta de compressão máxima e que o pilar de perfil retangular possui a menor tensão direta máxima.

Figura 35 - Gráfico contendo variação na tensão direta mínima para cada combinação.



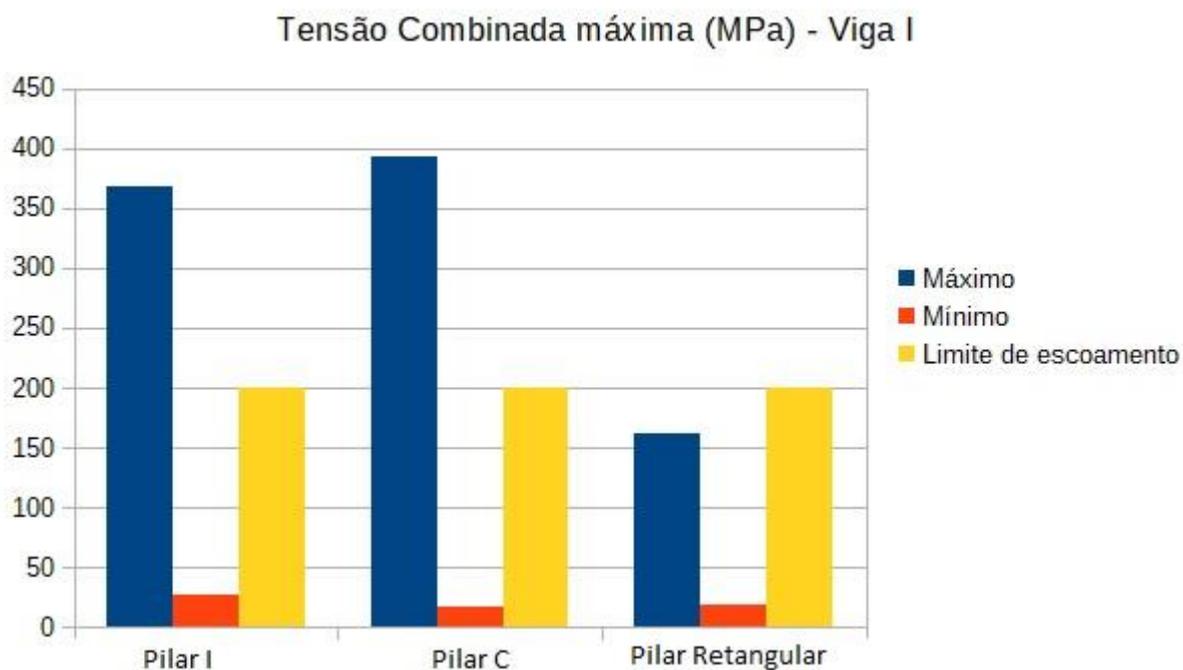
Fonte: Os autores.

Percebe-se na Figura 35, que, diferentemente da tensão máxima, há diferença na tensão direta mínima de acordo com a variação de perfil de viga. No entanto, há proporcionalidade quanto à variação de perfil do pilar. Como pode ser visualizado, a viga de perfil retangular possui menor tensão direta mínima, sendo menor no pilar de perfil C. As vigas do tipo C possuem maior tensão direta mínima.

De modo geral, quanto ao parâmetro tensão, a viga de perfil retangular se destaca, em especial em conjunto ao pilar retangular, visto que a tensão máxima direta é menor nesta configuração.

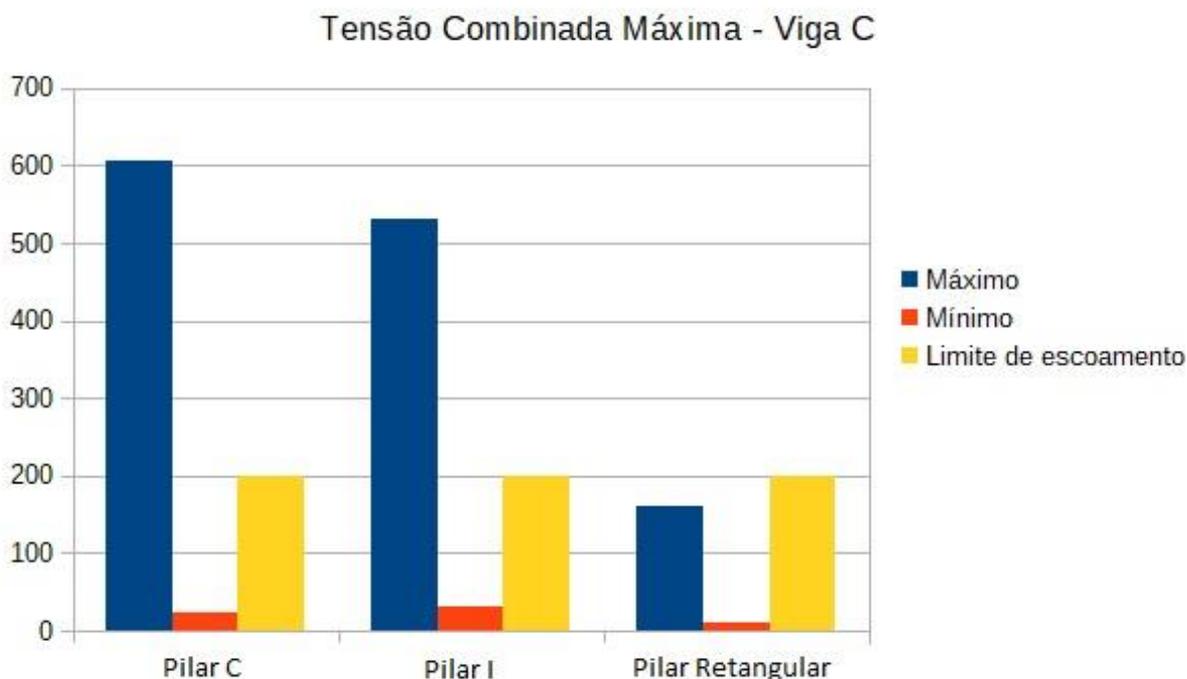
4.1.1.3 Tensões Combinadas

Figura 36 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Máxima para Viga I



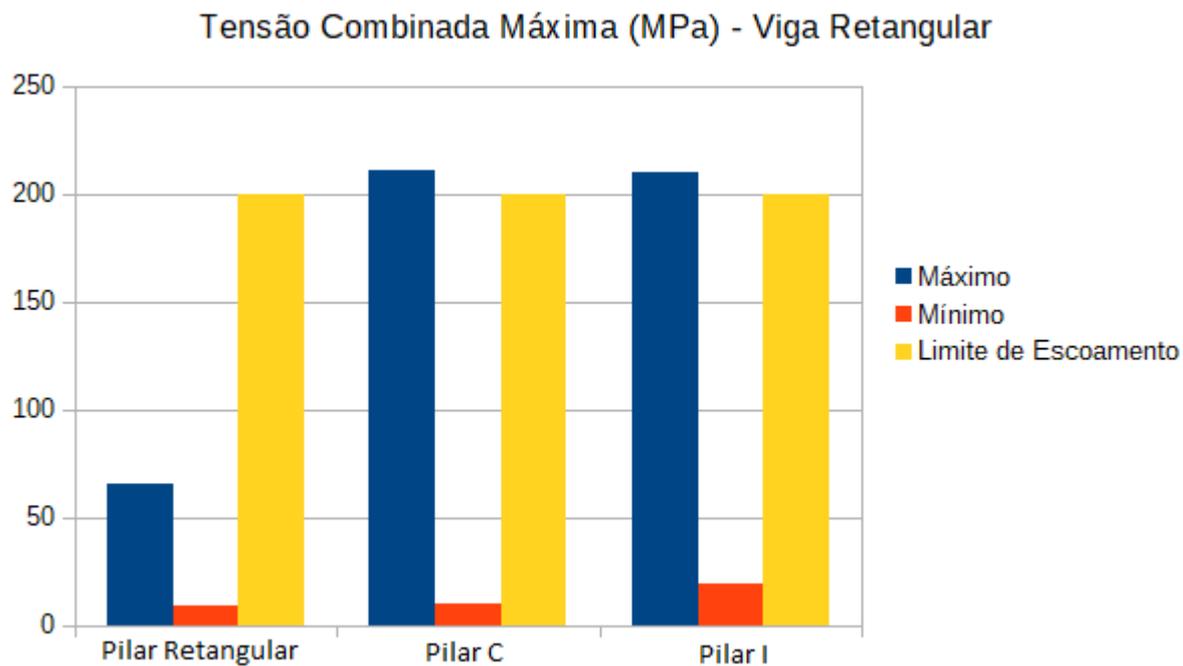
Fonte: Os autores.

Figura 37 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Máxima para Viga C.



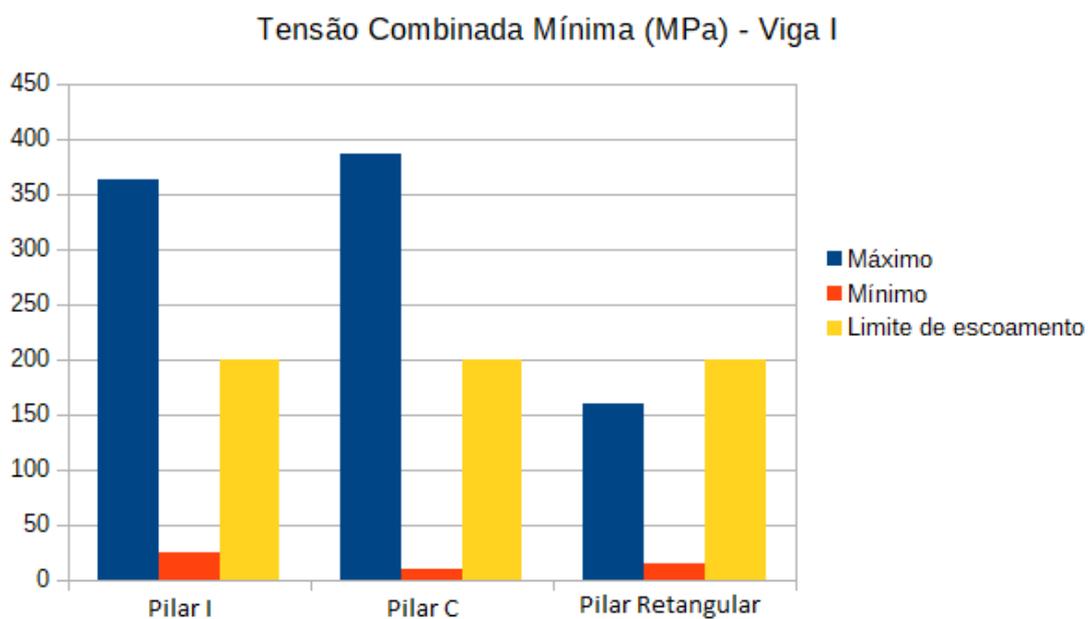
Fonte: Os autores.

Figura 38 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Máxima para Viga Retangular.



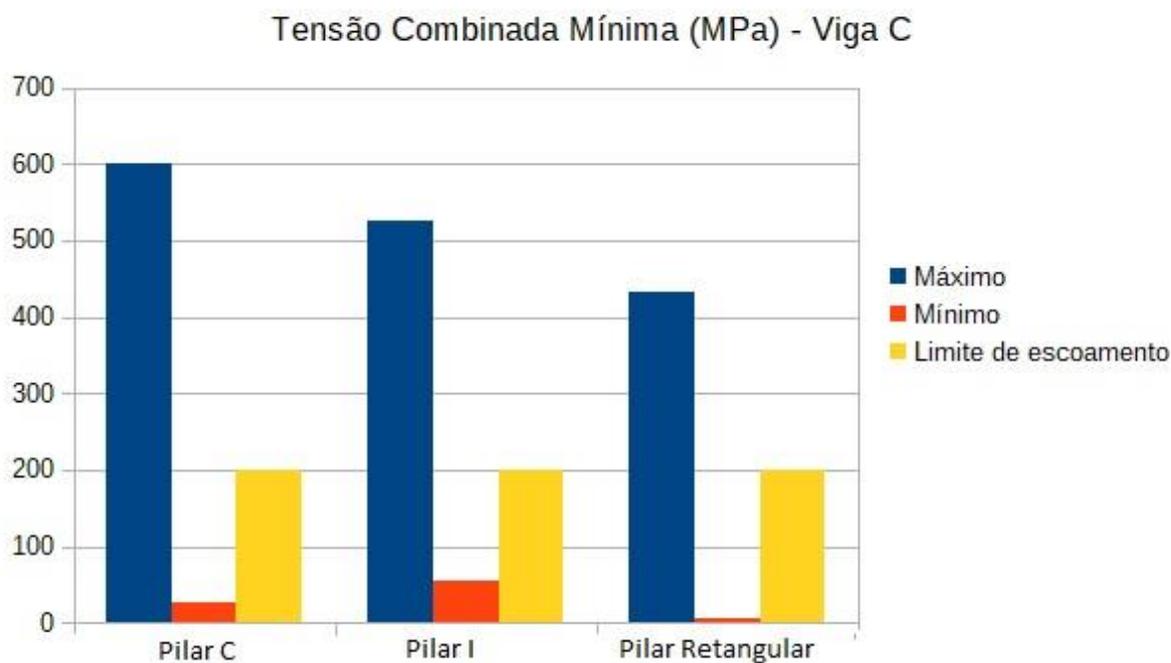
Fonte: Os autores.

Figura 39 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Mínima para Viga I.



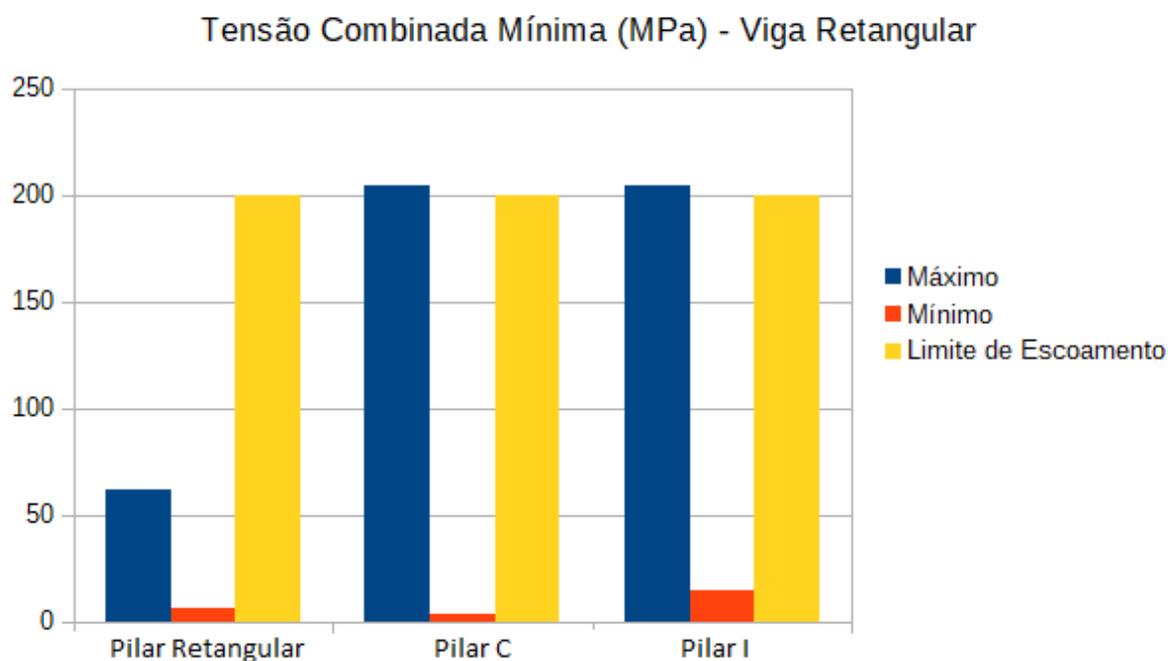
Fonte: Os autores.

Figura 40 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Mínima para Viga C.



Fonte: Os autores.

Figura 41 - Gráfico contendo variação na Tensão Combinada Mínima para Viga Retangular.



Fonte: Os autores.

Nas tensões combinadas de modo geral, as combinações que mais se destacam, por estarem abaixo do limite de escoamento do material, são: viga I e pilar retangular e viga retangular e pilar retangular, sendo que esta última combinação possui os valores mais baixos a nível de tensão combinada máxima e mínima. As demais combinações ultrapassam o limite do escoamento do material como é possível observar nos gráficos das Figuras 36 a 41. Portanto, essas combinações não são adequadas para aplicação estrutural.

4.1.2 Peso

O peso foi calculado a partir da massa linear fornecida pelos catálogos. Com este valor, foi possível determinar a massa multiplicando pelo comprimento total da viga/pilar. A Tabela 13 contém os valores das massas obtidas para cada perfil.

Tabela 13 - Massa total de cada perfil.

		Massa linear (kg/m)	Massa total (kg)
Perfil I	Viga	44,5	345,32
	Pilar	25,3	151,8
Perfil C	Viga	30,8	239,008
	Pilar	22,77	136,62
Perfil retangular	Viga	46,6	361,616
	Pilar	37,6	225,6

Fonte: Os autores.

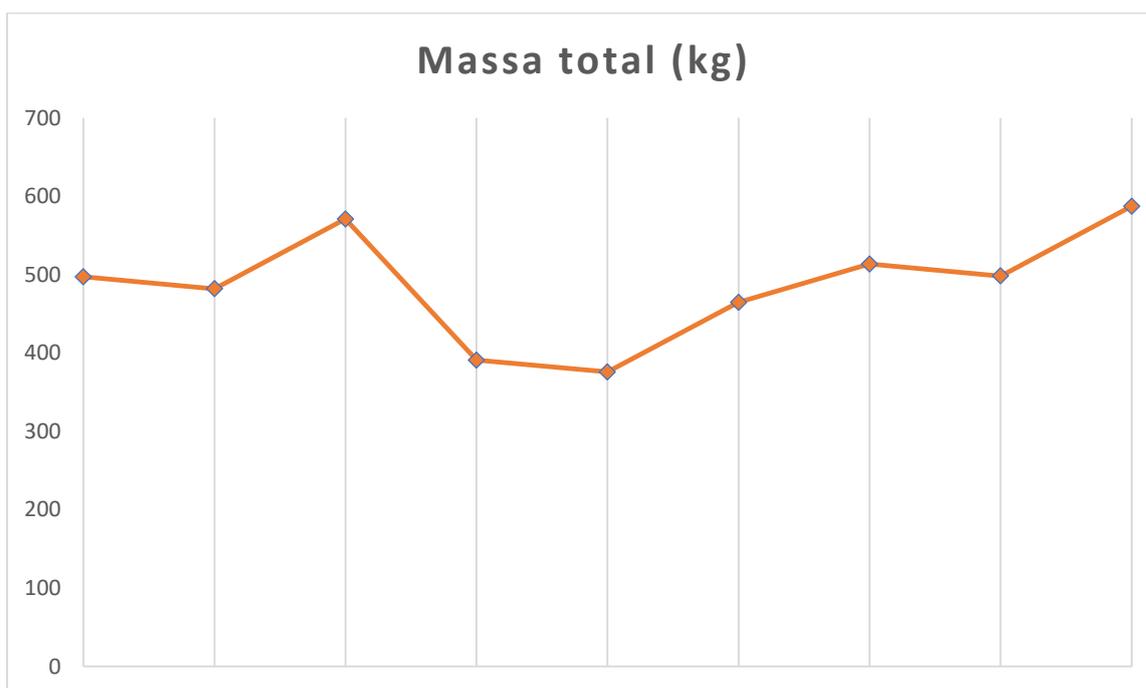
A partir desses valores encontrou-se a massa total de cada combinação (Tabela 14), possibilitando, desse modo, encontrar as combinações mais viáveis no parâmetro peso.

Tabela 14 - Massa total para cada combinação.

Combinações		Massa total (kg)
Viga I	Pilar I	497,12
	Pilar C	481,94
	Pilar ret.	570,92
Viga C	Pilar I	390,808
	Pilar C	375,628
	Pilar ret.	464,608
Viga Retangular	Pilar I	513,416
	Pilar C	498,236
	Pilar ret.	587,216

Fonte: Os autores.

O gráfico da Figura 42 possibilita visualizar de forma mais clara os valores obtidos na Tabela 14.

Figura 42 - Gráfico referente à massa total de cada configuração.

Fonte: Os autores.

A partir da ferramenta gráfica é possível observar que as configurações que contêm a viga de perfil C são as mais leves, sendo a mais leve a combinação viga e pilar de perfil C. Já as configurações que possuem viga de perfil retangular são as mais pesadas, sendo a mais pesada a combinação viga e pilar de perfil retangular. Portanto, quanto ao peso a combinação de viga e pilar de perfil C é a mais vantajosa.

4.1.3 Custo

Na análise financeira consultou-se empresas fornecedoras dos perfis utilizados para análise deste trabalho. Dentre as empresas fornecedoras estão a Comercial Gerdau Curitiba e a Aços Motta. No caso dos fornecedores da Gerdau, o preço é estimado através do peso do perfil ou por peça, onde cada peça possui doze metros. A aço Motta também vende por quilo, no entanto, não possui perfis retangulares da Vallourec, por isso, os dados utilizados para este perfil foram de uma outra marca com tamanho de perfil similar. Embora a espessura do perfil retangular da viga seja superior à selecionada no catálogo da Vallourec, adotou-se o preço como base já que no perfil retangular do pilar o valor é o mesmo. Desse modo, as demais medidas do perfil se mantiveram com os mesmos valores do catálogo da Vallourec.

A Tabela 15 apresenta os preços por massa de cada perfil e, a partir disso, se chegou no preço total para cada viga ou pilar.

É importante notar que os perfis do tipo C foram adaptados para catálogos de perfil do tipo I pois na empresa fornecedora não havia um catálogo baseado no perfil de tipo C. Por esse motivo, foram utilizados como base perfis equivalentes como forma de comparação.

Tabela 15 - Custo para cada elemento do pórtico.

			Equivalência de perfil	Preço/massa (R\$/kg)	Massa linear (kg/m)	Preço/ metro (R\$/m)	Preço/cada elemento
Perfil I	Viga	W310x 44,5	-----	4,99	44,5	222,06	1723,15
	Pilar	W250x25,3	-----	5,09	25,3	128,78	772,66
Perfil C	Viga	12" 305x 30,8	W310x23,8	5,09	23,8	121,14	940,06
	Pilar	10" 254x 22,77	W250x22,3	5,09	22,3	113,51	880,81
Perfil ret.	Viga	300x150x7,1	para t = 8 mm	5,38	46,6	250,71	1504,25
	Pilar	250x150x6,4	-----	5,38	37,6	202,29	1213,73

Fonte: Os autores.

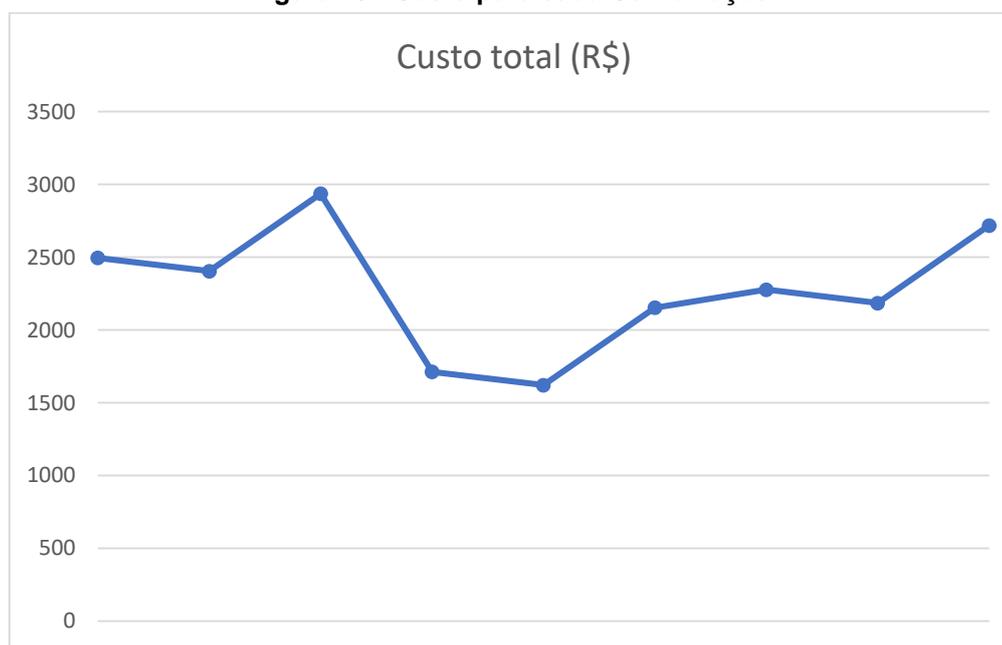
A partir dos resultados encontrados na Tabela 15 foi possível obter o custo para cada combinação do pórtico. Os resultados encontrados constam na Tabela 16.

Tabela 16 - Preço por combinação

Combinações		Custo total (R\$)
Viga I	Pilar I	2495,81
	Pilar C	2404,19
	Pilar ret.	2936,87
Viga C	Pilar I	1712,72
	Pilar C	1621,10
	Pilar ret.	2153,79
Viga Retangular	Pilar I	2276,91
	Pilar C	2185,29
	Pilar ret.	2717,98

Fonte: Os autores.

No gráfico da Figura 43 é possível perceber que a combinação viga e pilar de perfil C é a mais econômica e que a menos econômica é a combinação viga de perfil I e pilar de perfil retangular, seguido da viga retangular e pilar retangular.

Figura 43 - Custo para cada Combinação.

Fonte: Os autores.

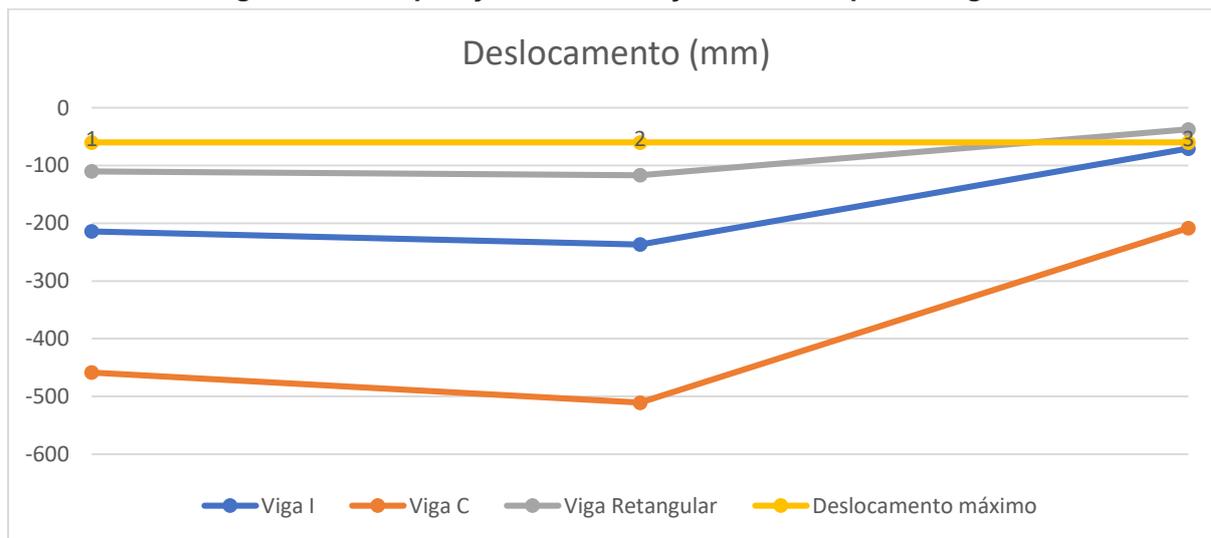
4.2 VALIDAÇÃO DA NORMA ABNT NBR 8800/2008

De forma a saber se o resultado deste trabalho caminhou de forma certa, é necessário verificar se o deslocamento máximo está de acordo com a Norma ABNT NBR 8800/2008 (item 2.2). Ou seja, se está dentro do limite determinado.

Considerando L como o vão entre os pilares, isto é, 15 metros, o valor do deslocamento máximo (δ_{max}) é de 60 milímetros.

Contudo, verificou-se que de todos os valores o único que se enquadrou dentro da norma foi a combinação viga e pilar retangular, como pode ser evidenciado no gráfico da Figura 44.

Figura 44 - Comparação da deformação entre os tipos de vigas.



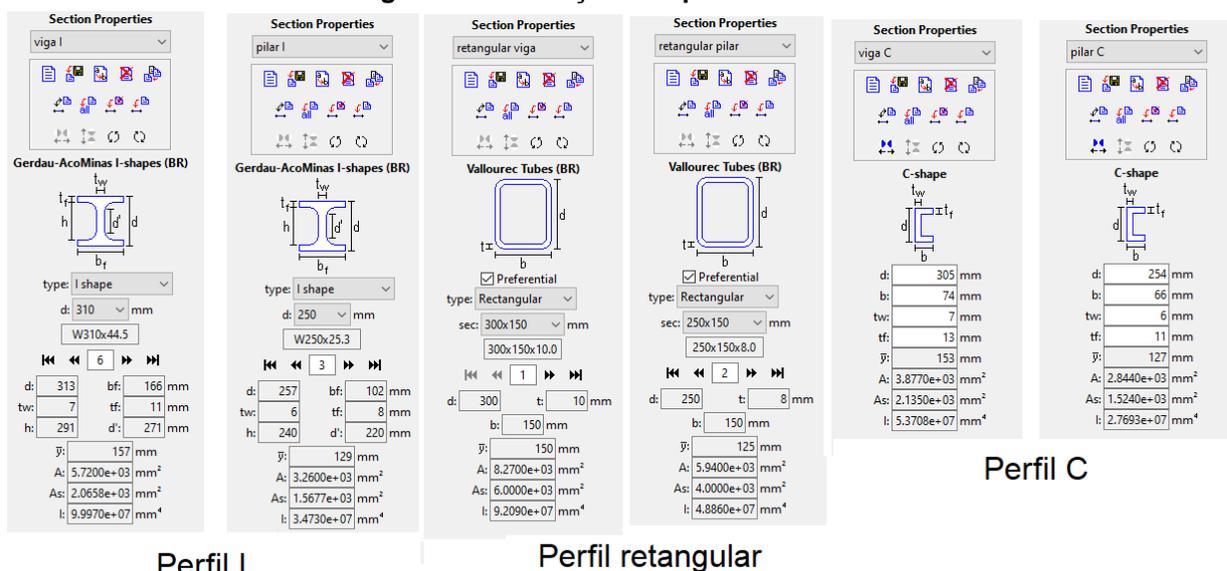
Fonte: Os autores.

Portanto, o perfil de viga e pilar retangular, como um todo, é o mais viável no parâmetro resistência mecânica.

4.3 VERIFICAÇÃO

Como base de verificação de resultados, utilizou-se a ferramenta computacional Ftool, um *software* gratuito, que não precisa de licença. A diferença entre os dois *softwares* é que no Ftool a maioria das geometrias dos perfis provém de catálogos padrões como o catálogo da Gerdau e da Vallourec, os quais foram utilizados para análise neste trabalho. Na Figura 45 pode se observar os diversos perfis relativos àqueles utilizados para análise neste presente trabalho.

Figura 45 - Definição dos perfis no Ftool.



Fonte: Os autores.

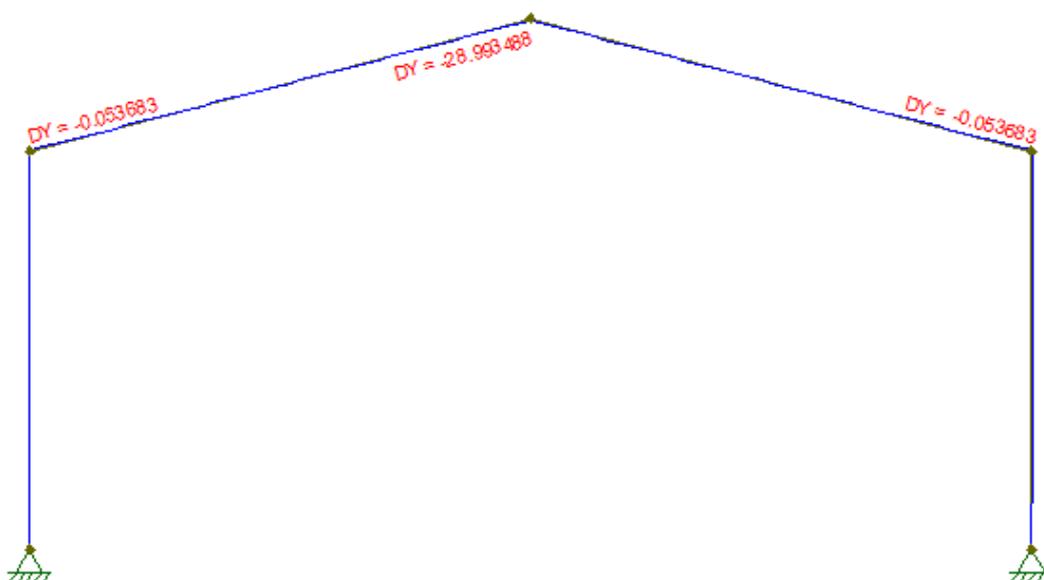
Como pode ser evidenciado na Figura 45, os perfis I e retangular provém de catálogos já arquivados no programa. A verificação foi realizada apenas com uma das combinações, viga e pilar ambos do tipo retangular, pois esta foi a melhor configuração dada pela análise. Como as medidas provém de catálogo, a geometria vem com medidas prontas. No caso, para a viga retangular o valor mínimo mais próximo foi o de 10 milímetros de espessura, como pode ser evidenciado no catálogo através da Figura 46. Portanto, foi necessário redimensionar o perfil no *software* ANSYS para comparar o valor do deslocamento no Ftool. Na Figura 47 é possível ver o deslocamento ao longo da viga de cobertura.

Figura 46 - Valor da espessura mínima mais próxima.

Dimensões Externas	Espessura da Parede	Massa por Unidade de Comp.
h x b (mm)	t (mm)	m (kg/m)
300 x 150	6,4*	42,1
	7,1*	46,6
	8,0*	52,3
	8,8	57,4
	10,0	64,9
	11,0	71,1
	12,5	80,3
	14,2	90,7
	16,0	101

Fonte: Os autores, tendo como referência Vallourec (p.47)

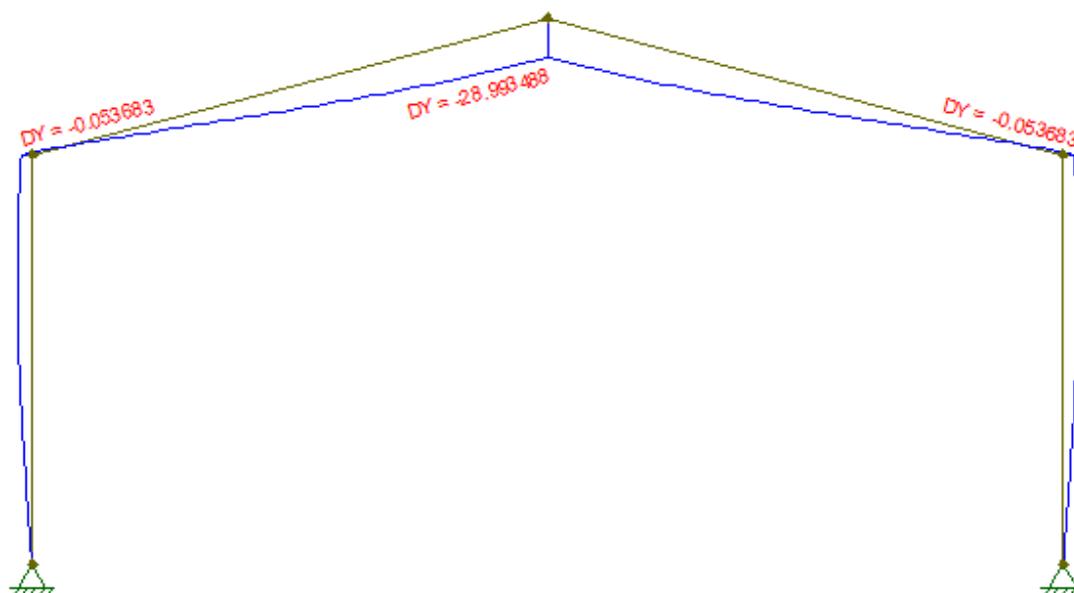
Figura 47 - Deslocamento máximo na viga retangular no Ftool.



Fonte: Os autores.

Como forma de melhor visualização colocou-se um fator de deformação de 20, que pode ser visualizado na Figura 48.

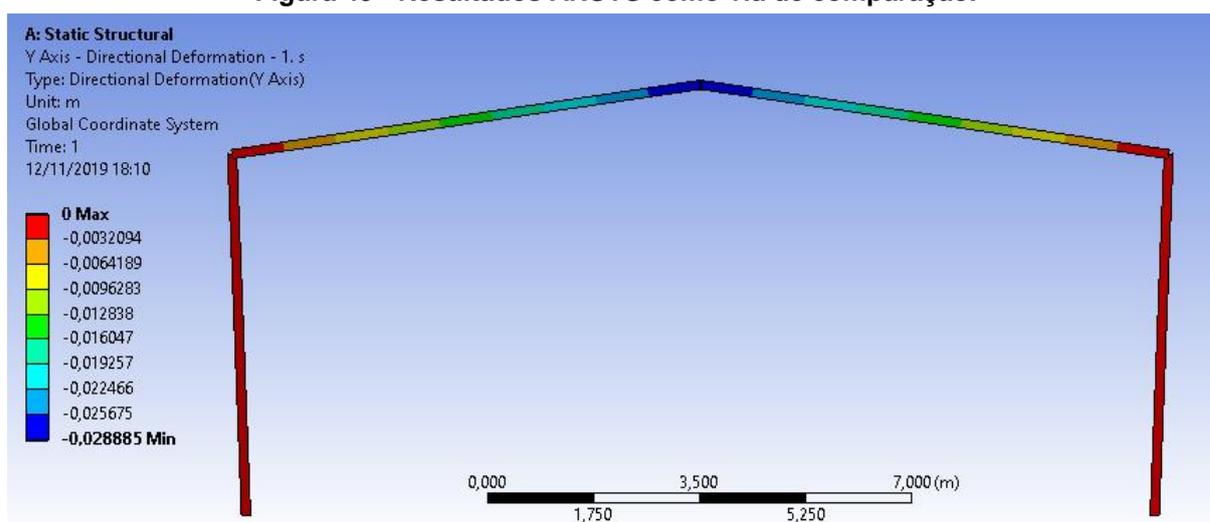
Figura 48 – Deslocamento (com amplificação para efeitos de visualização)



Fonte: Os autores.

Como observado, o valor do deslocamento máximo gerado no Ftool foi de 28,993 mm e, comparando com o valor obtido no ANSYS (Figura 49), que foi de 28,885 mm, pode-se dizer que os valores estão muito próximos, considerados, desse modo, equivalentes, com uma margem de erro de apenas 0,108 mm, que, quando comparado com a dimensão do pórtico, é considerado desprezível.

Figura 49 - Resultados ANSYS como via de comparação.



Fonte: Os autores.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados estruturais, observou-se que a deslocamento é melhor na combinação viga e pilar retangulares seguida pela combinação de viga I e pilar retangular, contudo, de modo geral, as vigas retangulares foram as que responderam melhor ao deslocamento, comparada às demais. Quanto à tensão direta, o melhor resultado se encontra novamente na combinação viga e pilar retangular, e, de modo geral, todas as combinações com pilar retangular tiveram resultados bons. Quanto à tensão combinada, a combinação mais adequada também é viga retangular e pilar retangular.

No quesito peso, os perfis do tipo C possuem grande destaque, em especial viga e pilar de perfil C. Contudo, as combinações mais pesadas são viga I e pilar retangular e viga e pilar retangular, sendo esta última a mais pesada.

Por fim, quanto ao custo de projeto, a combinação mais econômica é viga e pilar de perfil C e a mais cara é viga de perfil I e pilar de perfil retangular.

Diante da análise, percebe-se que os resultados obtidos na combinação de viga e pilar retangular são os mais adequados estruturalmente, ou seja, significa que, de modo geral, esta combinação respondeu bem para todos os parâmetros. Contudo, quanto ao peso, essa combinação é desvantajosa por ser a mais pesada. E quanto ao custo de projeto essa combinação é a segunda menos econômica. No entanto, como este trabalho leva em consideração como parâmetro base a análise estrutural, esta combinação é considerada a mais viável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este presente trabalho foi realizado para análise estrutural de um pórtico metálico utilizando o Método dos Elementos Finitos através de ferramenta computacional. O arranjo de diferentes combinações de perfis metálicos possibilitou identificar qual combinação foi mais viável estruturalmente. Além disso, foi realizada uma análise do peso e de custo dos perfis, possibilitando uma análise mais detalhada do projeto.

Considerando o que foi apresentado nesta proposta, conclui-se que o estudo deste projeto é válido, pois não existe ainda um motivo de escolha de perfil utilizado para a construção de pórticos metálicos. Além do mais, não se fez um estudo mais aprofundado para saber qual material é mais viável do ponto de vista estrutural e econômico, incluindo os parâmetros de resistência mecânica, de peso e de custo.

Observou-se com esta análise é direcionada apenas para pórticos de pequeno porte visto que, para maiores geometrias de perfil, não há a possibilidade de realizar diversas combinações pois não existem grandes dimensões para todos os perfis, com exceção do perfil I, em especial na viga cobertura onde são necessárias geometrias maiores.

Este estudo possibilitou analisar um pórtico metálico não apenas do ponto de vista estrutural, mas também econômico bem como quanto ao peso da estrutura. O interessante é poder analisar qual variável é mais interessante para o projeto do pórtico, que, no caso desse estudo, é a resistência mecânica, visto que este parâmetro determina qual perfil está de acordo com o deslocamento máximo regido pela norma ou mesmo qual perfil possui menor deslocamento máximo.

Apesar da combinação viga I e pilar retangular apresentar bons resultados, nesta análise a combinação que foi mais viável do ponto de vista estrutural foi a combinação viga e pilar do tipo retangular, além de obedecer ao deslocamento máximo regido pela norma.

REFERÊNCIAS

ALLGAYER, Alexandre André. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta de aço astm A36 soldado pelo processo de arco submerso (saw) com diferentes aportes térmicos**. 2017. 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário Univates. Disponível em: < <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1667/1/2017AlexandreAndreAllgayer.PDF>>. Acesso em 12 novembro 2019, 00:30.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Editora Érica, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças devidas ao vento em edificações**: NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**: NBR 8800. Rio de Janeiro, 2008. 237p.

AZEVEDO, Álvaro Ferreira Marques. **Método dos Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Portugal, 2003, 1^o Edição.

BANDEIRA, Alex A.;GONZALEZ, Marcio S. **Didática para o ensino superior aplicada às disciplinas de Teoria das Estruturas e Método dos Elementos finitos**. 12f. Artigo (Iniciação Científica de Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Disponível em: < <http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/11/artigos/3307.pdf>>. Acesso em: 10 novembro 2019, 19:10.

BARROS, Felício Bruzzi. **Métodos sem malha e Métodos dos elementos Finitos Generalizados em Análise Não-Linear de Estruturas**. 2002. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: < http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2002DO_FelicioBruzziBarros.pdf >. Acesso em: 27 maio 2018, 17:30.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5^o Edição. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2011.

CHAVES, José Roberto Ferreira. **Análise Dinâmica de Pórticos Metálicos Contraventados**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)

– Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2009. Disponível em: < <http://repositorio.unb.br/handle/10482/6515> > Acesso em: 06 maio 2018, 17:30.

COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS DA UTFPR. **Normas para a Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Curitiba: Editora UTFPR, 2009. 112p.

D'ÁLAMBERT¹, Flávio. **Galpão em pórticos com perfis estruturais laminados: Coletânea do uso do aço**. Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em aço. Rio de Janeiro: GERDAU, 5ª ed. 2012. 68f. Disponível em: <<http://calculistadeaco.com.br/wp-content/uploads/2017/03/Manual-Galpao.cdr-manual-galpoes-em-porticos-perfis-estruturais-laminados.pdf> > Acesso em: 07 jun 2018, 14:30.

D'ALAMBERT², Flávio; LIPPI, Ivan. **Tabela de vãos e cargas: Coletânea do uso do Aço**. 3ª Edição. São Paulo: Gerdau, 2012. 61f. Disponível em: < <http://www.skylightestruturas.com.br/downloads/manual-vaos-e-cargas.pdf> > Acesso em: 07 jun 2018. 14:20.

ECHEVERRI, Edwan Anderson Ariza. **Estudo sobre a utilização de ferramentas computacionais no ensino e aprendizagem do método dos elementos finitos**. 2010. 32 f. Projeto de Pesquisa – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo – SP, 2010. Disponível em: < https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2792825/mod_resource/content/3/Texto_elemento%20finitos.pdf > Acesso em: 27 maio 2018, 16:30.

FISH, J.(Jacob); BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2009.

GERDAU. **Barras e Perfis: Catálogo**. Porto Alegre – RS. 2009. Disponível em: <<https://www.gerdau.com.br/pt/produtos/catalogos-e-manuais#k=#s=41>> Acesso em: 29 maio 2018, 22:15

GERDAU¹. **Perfil I e U** Gerdau: Catálogo. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>> Acesso em 17 outubro 2018, 14:20

GERDAU². **Tabela de Bitolas:** Tabela. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>> Acesso em: 29 março 2019, 18:08

MOLINA, Julio Cesar; BERTOLINO JUNIOR, Renato. Análise Numérica da rigidez global do conjunto telha-terça em painéis laterais de aço. 2008. 12 f. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/46486055_Numeric_analysis_of_the_global_stiffness_of_group_purlin-sheeting_in_lateral_steel_panels>. Acesso em: 11 novembro 2019, 23:10.

NARDIN, Silvana de; SOUZA, Alex Sander Clemente de; PEREIRA, Margot Fabiana; SERAFIM, Jorge Augusto. **Análise Comparativa de soluções de pilares para galpões: pilares de aço, pré-moldados e mistos de aço e concreto.** – Universidade Federal de São Carlos. In: Congresso Latino-americano da construção metálica “Constru Metal”, Realização ABCEM (Associação Brasileira da Construção metálica). 2012. São Carlos – São Paulo. Disponível em: < https://www.abcem.org.br/construmetal/2012/arquivos/Cont-tecnicas/apresentacoes/18_ANALISE-COMPARATIVA-DE-SOLUCOES-DE-PILARES-PARA-GALPOES.pdf>. Acesso em: 20/10/2018.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas:** Uma abordagem integrada. 4^o Edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PINHO, Fernando Ottoboni. Galpões em pórticos de aço. GERDAU. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/artigo-galpao.pdf>> Acesso em: 20/10/2018.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Bases para Projeto Estrutural na Arquitetura.** São Paulo: Zigurate Editora, 2007.

SILVA, Alexandre Miguel Rufino. **Elemento de viga de formulação mista para aplicações estruturais.** 2014. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro, Portugal. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/14426/1/Elemento%20de%20viga%20de%20formula%C3%A7%C3%A3o%20mista%20para%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20estruturais.pdf>> Acesso em: 06 setembro 2018, 17:38.

SILVA, Andréa Regina Dias da. **Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas.** 2009. 322 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: < <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2247> >. Acesso em: 06 maio 2018,16:57.

takono, **Tabela Prática: Catálogo**. Disponível em: <www.takono.com.br> Acesso em: 23 outubro 2018, 19:04

VALLOREC, **Tubos Estruturais**: Catálogo. Belo Horizonte – MG. Disponível em: <<http://www.vallourec.com/COUNTRIES/BRAZIL/PT/Products-and-services/automotive-industrial-tubes/Documents/Catalogo%20Estruturais.pdf>> Acesso em 02 junho 2019, 02:33.