

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS GUARAPUAVA  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOÃO GUILHERME DE ALMEIDA PINTO**

**MÉTODO DE AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE PERFIL  
METÁLICO DO TIPO I LAMINADO DE ACORDO COM A  
NORMA NBR8800:2008 DE PROJETO DE ESTRUTURAS  
METÁLICAS**

**GUARAPUAVA**

**2019**

JOÃO GUILHERME DE ALMEIDA PINTO

**MÉTODO DE AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE PERFIL  
METÁLICO DO TIPO I LAMINADO DE ACORDO COM A  
NORMA NBR8800:2008 DE PROJETO DE ESTRUTURAS  
METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à  
Coordenação de Engenharia Mecânica, como  
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. David Lira Nunez

GUARAPUAVA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

**MÉTODO DE AUXÍLIO NA SELEÇÃO DE PERFIL METÁLICO  
DO TIPO I LAMINADO DE ACORDO COM A NORMA NBR8800:2008  
DE PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

JOÃO GUILHERME DE ALMEIDA PINTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 28 de Junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

David Lira Nuñez  
Prof. Orientador

---

Denise Alves Ramalho  
Membro Da Banca

---

Dyorge Alves Silva  
Membro Da Banca

---

Aldo Przybysz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

---

João Guilherme de Almeida Pinto

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

Pinto, João G. A. **Método de auxílio na seleção de perfil metálico do tipo I laminado de acordo com a norma NBR8800:2008 de projeto de estruturas metálicas.** 2019. 60 f. Trabalho de conclusão de curso para obtenção de título de bacharel em engenharia mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

## **RESUMO**

Perfis metálicos são elementos que garantem resistência e leveza para as estruturas, sejam estas de máquinas ou de edifícios. Estes apresentam inúmeras vantagens em relação aos elementos estruturais existentes, justificadas através da geometria da seção e das propriedades mecânicas dos aços. O setor industrial apresenta várias formas de utilização de estruturas, fato conferido durante o estágio curricular no setor de engenharia de confiabilidade, onde foi possível observar que as estruturas são superdimensionadas, tornando importante o interesse pelo projeto destas estruturas. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para a seleção de perfis I laminados, através de parâmetros indicados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da norma NBR 8800:2008. Para tal, é criado um algoritmo que traça a melhor escolha do perfil por meio da comparação da eficiência de todos os perfis e pesos por metro linear, fator que impacta diretamente no custo-benefício de um projeto mecânico. Para tanto, desenvolve uma rotina computacional com as propriedades geométricas das diferentes seções presentes no catálogo de perfis Gerdau, as características mecânicas do aço e os carregamentos solicitantes de projeto bem como suas verificações através dos cálculos analíticos. Após a construção do método de seleção de perfis, a validação desse trabalho se deu por meio da aplicação em um estudo de caso da literatura acadêmica, a qual corroborou a escolha da viga usando o método proposto.

**Palavras-chave:** Perfis metálicos. Seleção de perfil I. NBR 8800.

**PINTO, João G A. Método de auxílio na seleção de perfil metálico do tipo I laminado de acordo com a norma NBR8800: 2008 de projeto de estruturas metálicas.** 2019. 60 f. Completion of coursework to obtain a bachelor's degree in Mechanical Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

### **ABSTRACT**

Metal beam are elements that guarantee resistance and lightness to the structures, be these of machines or of buildings. These have numerous advantages over existing structural elements, justified by the geometry of the section and the mechanical properties of the steels. The industrial sector presents several ways of using structures, a fact conferred during the curricular stage in the reliability engineering sector, where it was possible to observe that the structures are oversized, making an interest in the design of these structures important. The present work has the objective of developing a method for the selection of rolled I beam, through parameters indicated by the Brazilian Association of Technical Standards through the NBR 8800: 2008 standard. For this, an algorithm is created that traces the best profile choice by comparing the efficiency of all profiles and weights per linear meter, a factor that directly impacts the cost-benefit of a mechanical design. In order to do so, it develops a computational routine with the geometric properties of the different sections present in the Gerdau profile catalog, the mechanical characteristics of the steel and the requesting project loads as well as its checks through the analytical calculations. After the construction of the profile selection method, the validation of this work was done through the application in a case study of the academic literature, which corroborated the choice of the beam using the proposed method.

**Keywords:** Metal beam. I beam selection. NBR 8800.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Serra Pelada Município de Curionópolis PA.....	9
<b>Figura 2</b> - Ponte de Coalbrookdale na Inglaterra.....	10
<b>Figura 3</b> - Forno de Bessemer .....	11
<b>Figura 4</b> - Evolução da utilização do aço por setor .....	13
<b>Figura 5</b> - Perfis siderúrgicos mais utilizados no Brasil.....	18
<b>Figura 6</b> - Perfil I laminado (parâmetros geométricos) .....	18
<b>Figura 7</b> - Tipos de hastes em função da solicitação .....	22
<b>Figura 8</b> - Sistemas de Contraventamento.....	24
<b>Figura 9</b> - Tipos de flambagens sujeitas em uma viga de alma cheia .....	31
<b>Figura 10</b> - Plastificação total da seção .....	34
<b>Figura 11</b> - Tela inicial da Planilha de seleção de perfis .....	40
<b>Figura 12</b> - Biblioteca de perfis Gerdau tipo I laminado.....	41
<b>Figura 13</b> - Tela para inserção dos parâmetros.....	42
<b>Figura 14</b> - Tela para escolha do perfil.....	43
<b>Figura 15</b> - Tela de verificação quanto à esbeltez .....	43
<b>Figura 16</b> - Tela para verificação quanto à carga axial .....	44
<b>Figura 17</b> - Tela para verificação à flexão.....	45
<b>Figura 18</b> - Tela para verificação quanto ao cisalhamento.....	45
<b>Figura 19</b> - Tela para verificação quanto à combinação de esforços .....	46
<b>Figura 20</b> - Otimização dos perfis .....	47
<b>Figura 21</b> - Estudo de caso. ....	48
<b>Figura 22</b> - Solicitações do projeto.....	49
<b>Figura 23</b> - Aplicação dos parâmetros de projeto.....	49
<b>Figura 24</b> - Parâmetros do perfil escolhido pelo autor .....	50
<b>Figura 25</b> - Verificação quanto à esbeltez .....	50
<b>Figura 26</b> - Verificação quanto à carga axial.....	51
<b>Figura 27</b> - Verificação quanto à flexão .....	52
<b>Figura 28</b> - Verificação quanto ao cisalhamento.....	52
<b>Figura 29</b> - Verificação quanto à combinação dos esforços.....	53
<b>Figura 30</b> - Resultado da otimização para as combinações de projeto.....	56
<b>Figura 31</b> - Sistema de suporte de tubulação de vapor.....	61
<b>Figura 32</b> - Sistema de suporte (vista isométrica). ....	62
<b>Figura 33</b> - Esboço plano frontal com cargas .....	62
<b>Figura 34</b> - Parâmetros de projeto da Viga.....	63
<b>Figura 35</b> - Parâmetros de projeto da Coluna.....	63
<b>Figura 36</b> - Resultado do método para a Viga.....	64
<b>Figura 37</b> - Resultado do método para a Coluna.....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Tipos de aços e características mecânicas .....	17
<b>Tabela 2</b> - Validação dos resultados obtidos pelo método .....	54

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Coeficiente K de comprimento de flambagem .....	30
<b>Quadro 2</b> - Parâmetros de cálculo referentes ao momento fletor resistente.....	33
<b>Quadro 3</b> - Coeficientes de ponderação das resistências.....	36



## LISTA DE FLUXOGRAMAS

<b>Fluxograma 1</b> – Delineamento do trabalho.....	38
---	----

## LISTA DE DIAGRAMAS

<b>Diagrama 1</b> - Tensão x Deformação .....	15
<b>Diagrama 2</b> - Valor de Kappa em função do índice de esbeltez reduzido .....	28

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	27
Equação 2.....	27
Equação 3.....	27
Equação 4.....	28
Equação 5.....	28
Equação 6.....	29
Equação 7.....	29
Equação 8.....	29
Equação 9.....	29
Equação 10.....	30
Equação 11.....	31
Equação 12.....	31
Equação 13.....	31
Equação 14.....	33
Equação 15.....	34
Equação 16.....	34
Equação 17.....	34
Equação 18.....	34
Equação 19.....	34
Equação 20.....	34
Equação 21.....	34
Equação 22.....	35
Equação 23.....	35
Equação 24.....	35
Equação 25.....	35
Equação 26.....	35
Equação 27.....	36
Equação 28.....	36
Equação 29.....	36
Equação 30.....	36
Equação 31.....	37
Equação 32.....	37
Equação 33.....	37
Equação 34.....	37
Equação 35.....	37
Equação 36.....	37
Equação 37.....	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F$	Tensão do material
$f_u$	Tensão última
$f_y$	Tensão de escoamento
$f_p$	Tensão de proporcionalidade
$\varepsilon$	Deformação específica
$\varepsilon_u$	Deformação específica quando ocorre a última tensão
$\varepsilon_y$	Deformação limite específica quando ocorre a tensão de escoamento
$\varepsilon_p$	Deformação específica quando ocorre a tensão de proporcionalidade
$\alpha$	Ângulo de inclinação da região elástica
$E$	Módulo de elasticidade
$\nu_a$	Coefficiente de Poisson
$\beta$	Coefficiente de dilatação térmica
$\gamma_a$	Peso específico
$G$	Módulo de elasticidade transversal
$J$	Momento polar de inércia
$b_f$	Largura da mesa
$t_f$	Espessura da mesa
$t_w$	Espessura da alma
$h$	Altura da alma
$d$	Altura do perfil
$N_{t,Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo
$N_{t,Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo
$A_g$	Área bruta da seção transversal
$f_y$	Limite de escoamento do aço
$\gamma_{a2}$	Coefficiente de ponderação da resistência
$A_{be}$	Área líquida efetiva da seção transversal
$f_u$	Limite de ruptura do aço
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$\chi$	Fator de redução total associado à resistência à compressão
$Q$	Fator de redução total que está associado à flambagem local
$\lambda_0$	Índice de esbeltez reduzido
$N_e$	Força axial de flambagem elástica
$t$	Espessura do elemento analisado (alma ou mesa)
$N_{ex}$	Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x
$I_x$	Momento de inércia do eixo x
$K_x$	Coefficiente de comprimento de flambagem em relação ao eixo x
$L_x$	Comprimento destravado da barra no eixo x
$N_{ey}$	Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y
$I_y$	Momento de inércia do eixo y
$K_y$	Coefficiente de comprimento de flambagem em relação ao eixo y
$L_y$	Comprimento destravado da barra no eixo y
$N_{ez}$	Flambagem por flexão em relação ao eixo longitudinal z
$r_0$	Raio de giração
$C_w$	Constante de empenamento da seção transversal

$K_z$	Coeficiente de comprimento de flambagem em relação ao eixo longitudinal z
$L_z$	Comprimento de flambagem por torção
$r_x$	Raio de giração da seção transversal em relação ao eixo x
$r_y$	Raio de giração da seção transversal em relação ao eixo x
$\lambda$	Índice de esbeltez
$\lambda_p$	Índice de esbeltez referente à plastificação do material
$\lambda_r$	Índice de esbeltez referente ao início do escoamento
$M_{Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo
$M_{Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo
$W$	Módulo de resistência elástico mínimo da seção, relativo ao eixo de flexão
$\gamma_{a1}$	Coeficiente de ponderação da resistência
$M_{pl}$	Momento fletor de plastificação da seção transversal
$C_b$	Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme
$M_r$	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
$M_{cr}$	Momento fletor de flambagem elástica
$\sigma_r$	Tensão de residual de compressão nas mesas
$L_b$	Comprimento destravado entre duas seções submetidas à flambagem lateral com torção
$Z$	Módulo de resistência plástico da seção
$V_{Rd}$	Força de cisalhamento resistente de cálculo
$V_{Sd}$	Força de cisalhamento solicitante de cálculo
$V_{pl}$	Força cisalhante de plastificação
$A_w$	Área da alma do perfil de aço
$k_v$	Coeficiente de cisalhamento

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Técnicas
CBCA	Centro Brasileiro de Construção em Aço
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
SI	Sistema Internacional de Unidades
FLT	Flambagem Lateral com Torção
FLM	Flambagem Lateral da Mesa
FLA	Flambagem Lateral da Alma
N/A	Não Aplicável

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	Objetivo Geral .....	14
1.2.2	Objetivos Específicos .....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS METÁLICOS .....	15
2.1.1	Propriedades Mecânicas do Aço Estrutural.....	16
2.1.2	Tipos de Aços Estruturais.....	17
2.2	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DO PERFIL DO TIPO I LAMINADO .....	17
2.3	ESTRUTURAS METÁLICAS .....	18
2.3.1	Vantagens .....	19
2.3.2	Desvantagens.....	20
2.4	NORMA NBR 8800:2008.....	20
2.5	SISTEMAS ESTRUTURAIS EM AÇO.....	20
2.5.1	Elementos Estruturais.....	21
2.5.2	Sistema Planos Formados Por Elementos Lineares .....	22
2.5.3	Comportamento Das Ligações .....	23
2.5.4	Estruturas Aporticadas Para Edificações.....	23
2.6	MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES (PROCEDIMENTO DE CÁLCULO).....	24
2.6.1	Tração de Barras.....	25
2.6.2	Compressão de Barras .....	26
2.6.3	Flexão de Barras .....	30
2.6.4	Barras Submetidas À Combinação de Esforços .....	35
2.7	COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA AS RESISTÊNCIAS .....	36
2.8	OTIMIZAÇÃO.....	36
<b>3</b>	<b>ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>38</b>
3.1	PLANILHA DE CÁLCULO .....	38
3.2	MÉTODOS DE SELEÇÃO DE PERFIL .....	39
3.3	PLANILHA DE SELEÇÃO DE PERFIS.....	39
3.4	BIBLIOTECA DOS PERFIS GERDAU DO TIPO I LAMINADO .....	40
3.5	PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO .....	41
3.6	VERIFICAÇÕES DOS PERFIS QUANTO ÀS CARGAS SOLICITANTES.....	43
3.7	OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DOS PERFIS DO TIPO I LAMINADO .....	46
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....</b>	<b>48</b>
4.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO .....	48
4.2	VERIFICAÇÃO QUANTO ÀS SOLICITAÇÕES DE PROJETO .....	50
4.2.1	Verificação Quanto À Esbeltez .....	50
4.2.2	Verificação Quanto À Carga Axial .....	51
4.2.3	Verificação Quanto à Flexão .....	51
4.2.4	Verificação Quanto Aos Esforços Cisalhantes.....	52
4.2.5	Verificação Quanto à Combinação dos Esforços .....	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
5.1	RESULTADOS .....	54
5.2	DISCUSSÕES .....	55
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>57</b>
6.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	57

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM ESTUDO DE CASO REAL.....</b>	<b>61</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Com o advento da tecnologia, o homem passou a buscar técnicas que tornassem seu dia mais fácil. A tecnologia possui um papel fundamental para a evolução e modernidade dos povos. Foi a partir do século XVIII, durante um período determinante, que a tecnologia teve seu maior fomento e crescimento. O advento da industrialização possibilitou o crescimento dos centros urbanos, o qual recebia cada vez mais pessoas vindas do campo. O surgimento do aço em larga escala, foi um fator predominante para que a tecnologia se desenvolvesse, pois a partir dele foi possível a criação de máquinas. Desde então, inúmeras indústrias e estruturas foram capazes de serem projetadas, o que torna o aço um material de grande relevância histórica. A nova organização mundial tem provocado mudanças radicais no cenário geopolítico, organizacional e tecnológico que institui novos suportes sociais. Quando se trata da esfera tecnológica da construção metal/mecânica, a utilização de elementos metálicos tem trazido grandes benefícios, como maior rapidez e variedade de sistemas estruturais em geral.

**Figura 1** - Serra Pelada Município de Curionópolis PA



**Fonte:** Adaptado de Carta Capital (2014)

Mineração é o nome atribuído à ação de extrair substâncias minerais de rochas ou do solo. Este termo surgiu durante o século XVI, onde os pesquisadores entusiastas tinham o intuito de compreender as várias formas, valores e funções que estes produtos apresentavam. Porém, o ato de minerar já era conhecido pela civilização, muito antes do surgimento do calendário cristão, onde naquela época, a preocupação era encontrar materiais capazes de produzir: armas, utensílios domésticos e ferramentas para a agricultura. Na Figura 1, um exemplo marcante da mineração no Brasil, foi a formação da Serra Pelada, no estado do Pará (CHAMBERLAIN, 2013).

O primeiro material siderúrgico utilizado em escala na construção foi o ferro fundido. No ano de 1750, encontravam-se em monumentos e arcos ogivais, formas em ferro com a intenção de resistência e elegância. Entre 1780 e 1820 pontes arcadas e treliçadas começaram a surgir, com o principal material o ferro fundido, os quais trabalhavam em compressão. A primeira ponte construída totalmente em ferro fundido se encontrava na Inglaterra, cujo nome era em homenagem à cidade de Coalbrookdale e ficava sobre o rio Severn, Figura 2. Era composta por um arco com um vão de 30 m, construído em 1779 (PFEIL; PFEIL, 2009).

**Figura 2** - Ponte de Coalbrookdale na Inglaterra



**Fonte:** Adaptado de Estórias da História (2015)

Com a grande aceitação do mercado das estruturas metálicas, o ferro forjado fora obtido dentro das siderúrgicas, a partir de experimentos com o ferro fundido, na qual adiciona-se resistência pelo processo de forjamento. No século XVIII teve-se o primeiro contato com o ferro forjado, em estruturas de correntes de barras a qual formavam os elementos portantes das pontes suspensas. A primeira estrutura que continha ferro dessa classificação, se encontra no país de Gales, é uma ponte suspensa na qual utiliza barras de ferro forjado e foi construída entre os anos de 1819 e 1826, ano da conclusão da obra. Esta ponte foi um marco da época, pois apresenta um vão livre de 175 m de comprimento (PFEIL; PFEIL, 2009).

**Figura 3 - Forno de Bessemer**



**Fonte:** Adaptado de Coisiaço (2013)

O aço já era um elemento conhecido desde a antiguidade, onde os artesãos adicionavam carvão na fusão do ferro. Porém, este processo era extremamente raro e por conta disso muito caro. A utilização do aço em grande escala só foi possível com o surgimento de um forno industrial capaz de realizar o processo. Esse forno, Figura 3, foi inventado em 1856 pelo inglês Henry Bessemer. Este era um engenheiro metalúrgico, o qual atribuiu o nome do forno de processo de Bessemer. Seu interesse na verdade era a produção de um canhão de batalha que pudesse arremessar a munição com um maior alcance. O engenheiro percebeu que a grande

limitação era com o ferro que utilizavam na produção dos mesmos. Entre os anos de 1860 e 1870 o aço já estava sendo utilizado em maior escala, substituindo quase que em totalidade o ferro fundido, exceto em algumas aplicações específicas (CALLISTER JR, 2008).

No cenário nacional, o uso de perfis metálicos tem sido recorrente. É possível observar com frequência as linhas treliçadas de coberturas de shoppings, mercados, igrejas e estruturas de locação em geral. O aço tem sido largamente utilizado, pois garante leveza e velocidade de execução do seu sistema estrutural. Para que os projetos sejam cada vez mais viáveis e otimizados, alguns estudos de material, montagem e cálculo estrutural devem ser analisados, de forma a sempre garantir segurança aos usuários. Normas em todo o mundo discutem as melhores formas de se organizar os elementos de uma estrutura metálica, no Brasil a norma utilizada como referência para esses projetos é a NBR-8800:2008.

Durante o estágio curricular no setor de engenharia de confiabilidade em uma indústria de papel na região de Guarapuava, teve-se a oportunidade de conhecer os parâmetros de cálculo e montagem de estruturas mecânicas, a qual é largamente utilizada neste setor. As estruturas se apresentavam em todos os conjuntos de equipamentos, sempre com a função de suportar as cargas dos elementos mecânicos instalados. Este cenário, aliado às disciplinas de mecânica dos sólidos e materiais de construção mecânica, cursadas em engenharia mecânica, forneceu a base para poder entender as estruturas aplicadas e assim poder analisar a robustez dos sistemas instalados. Assim, verificou-se que muitas estruturas eram superdimensionadas e não se pensava no custo de instalação. Por conta disso, surgiu a motivação de estudar formas de dimensionar estruturas metálicas de perfis I laminado, (que são os mais utilizados em estruturas de máquinas), levando em consideração a melhor maneira de se realizar a seleção do perfil, garantindo a economia de material a partir da eficiência da peça.

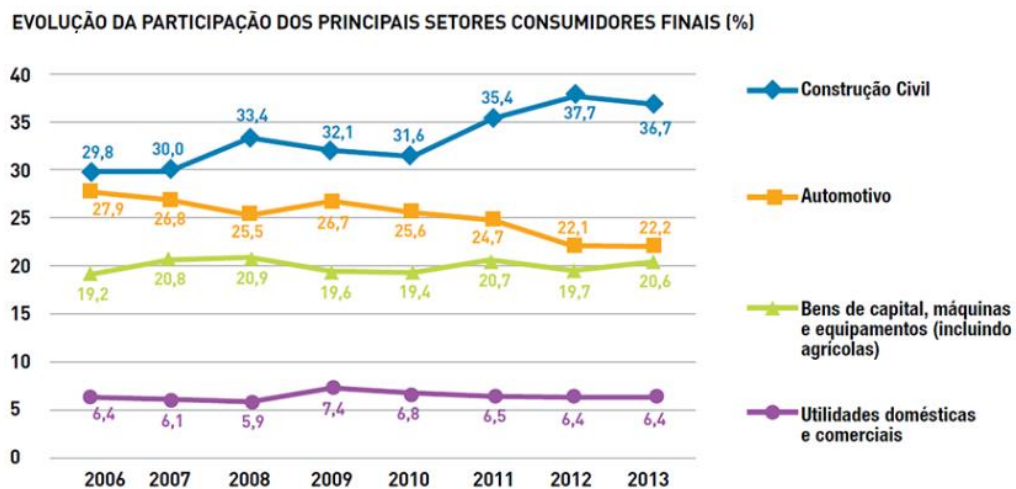
A proposta deste trabalho é fornecer um método de seleção de perfis I laminado, para uma determinada aplicação, uma vez que, a norma NBR 8800:2008 não traz a maneira que isso deve ser feito. A partir desta deficiência encontrada, o método exposto neste trabalho fornece a melhor escolha de perfil do catálogo Gerdau para cada combinação de carga.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo o Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) a construção civil é o setor que mais consome produtos siderúrgicos no Brasil, assim como no mundo todo. Atualmente, responde por 37% do total do consumo aparente de aço no país, como mostrado na Figura 4. A partir deste dado, houve um interesse significativo dos engenheiros em desenvolver projetos mecânicos que atendam o setor industrial e civil do aço. A engenharia de estruturas metálicas é um ramo da engenharia mecânica, previsto em estudos de mecânica dos sólidos e materiais de construção mecânica.

A norma NBR 8800 (2008) aborda importantes aspectos para verificação de vigas metálicas, porém não aborda um método de escolha de perfis de catálogos comerciais, pois considera uma condição de projeto ligada à regionalidade e aspectos logísticos, pois nem sempre todos os perfis estão disponíveis no mercado regional. Assim, a implementação da rotina computacional proposta neste trabalho para executar tal atividade, torna a verificação do perfil mais facilitada garantindo maior segurança e economia de material. Assim, todos os engenheiros e acadêmicos que estudam e trabalham com estruturas metálicas podem ganhar tempo e praticidade aplicando-se o método proposto, garantindo um maior tempo na otimização dos perfis, quando perfis do tipo I laminado forem aplicáveis à região e às condições do projeto.

**Figura 4** - Evolução da utilização do aço por setor



Fonte: Instituto Aço Brasil (2019).

## **1.2 OBJETIVOS**

Neste item estão descritos os objetivos geral e específicos deste trabalho.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Com a utilização da norma NBR 8800 na sua última revisão de 2008, é elaborado um procedimento de seleção e verificação de vigas metálicas de perfil I laminado para uso cotidiano de um projetista.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os seguintes objetivos específicos direcionam o presente trabalho a alcançar o objetivo geral:

- Identificar aspectos importantes da norma NBR 8800:2008, para a tomada de decisão mais eficiente nos cálculos para a seleção e verificação de perfil metálicos do tipo I laminado;
- Utilizar o método para realizar a escolha do perfil para cada aplicação desejada, a fim de ter o melhor custo-benefício através da eficiência do perfil e seu peso por metro linear.
- Demonstrar a aplicabilidade da rotina computacional através de um exemplo de verificação de um perfil I laminado encontrado na literatura;
- Verificar novas aplicações e melhorias para a método desenvolvido, a fim de ampliar os resultados para a gama de perfis disponíveis no mercado.

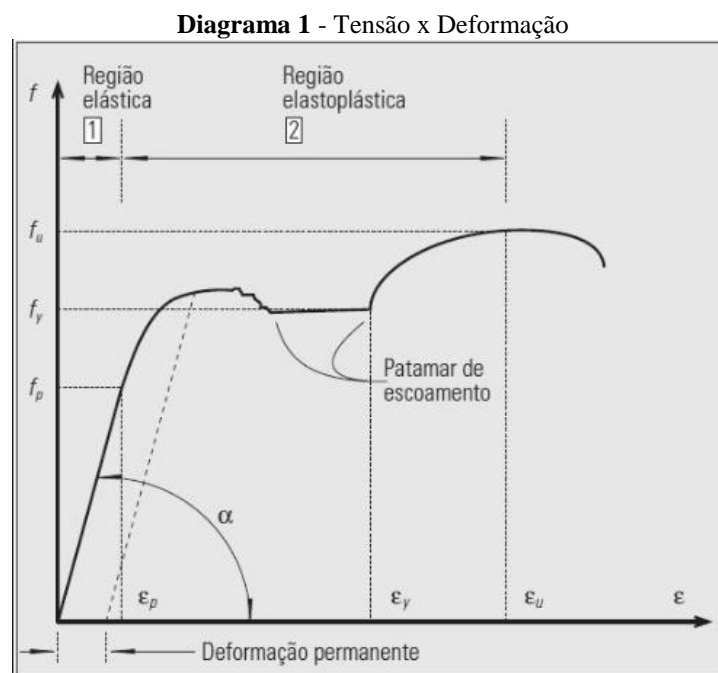
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item será apresentada as propriedades mecânicas dos materiais metálicos, suas vantagens e desvantagens, algumas características de estruturas metálicas e por fim toda a fundamentação teórica de cálculo para o desenvolvimento do método para seleção de perfis do tipo I laminado.

### 2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS METÁLICOS

Os perfis de aço estrutural são fabricados conforme características mecânicas e químicas de acordo com o que é desejado para o produto final. A escolha do tipo do aço a ser utilizado em um projeto, é um fator determinante na resistência desse perfil quanto aos esforços solicitantes (PINHEIRO, 2015).

O diagrama de tensão versus deformação dos aços dúcteis, apresentado no Diagrama 1, é um parâmetro que estabelece muitas limitações para os projetos. A partir dele é possível encontrar valores importantes que traçam os comportamentos mecânicos em números, utilizados para cálculos.



**Fonte:** Adaptado de Pinheiro (2015).

Onde:

$f$  – tensão do material;

$f_u$  – tensão última;

$f_y$  – tensão de escoamento;

$f_p$  – tensão de proporcionalidade;

$\varepsilon$  – deformação específica;

$\varepsilon_u$  – deformação específica quando ocorre a última tensão;

$\varepsilon_y$  – deformação limite específica quando ocorre a tensão de escoamento;

$\varepsilon_p$  – deformação específica quando ocorre a tensão de proporcionalidade;

$\alpha$  – ângulo de inclinação da região elástica.

### 2.1.1 Propriedades Mecânicas do Aço Estrutural

As propriedades mecânicas do aço estrutural, utilizadas nos cálculos de verificação dos perfis metálicos, segundo Pinheiro (2015) estão descritas abaixo:

a) Módulo de Elasticidade (E):

$$E = tg(\alpha) \approx 205 \text{ GPa}$$

b) Coeficiente de Poisson ( $\nu_a$ ):

$$\nu_a = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \approx 0,3$$

c) Coeficiente de Dilatação Térmica ( $\beta$ ):

$$\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

d) Peso Específico ( $\gamma_a$ ):

$$\gamma_a = 77 \text{ KN/m}^3$$



e) Módulo de Elasticidade Transversal (G):

$$G = 0,385 E \approx 78,9 \text{ GPa}$$

### 2.1.2 Tipos de Aços Estruturais

O aço é um elemento largamente difundido, por conta disso apresenta inúmeras variações na composição química a qual recebem uma denominação. Neste presente trabalho será utilizado apenas três tipos e suas características mecânicas estão dispostas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Tipos de aços e características mecânicas

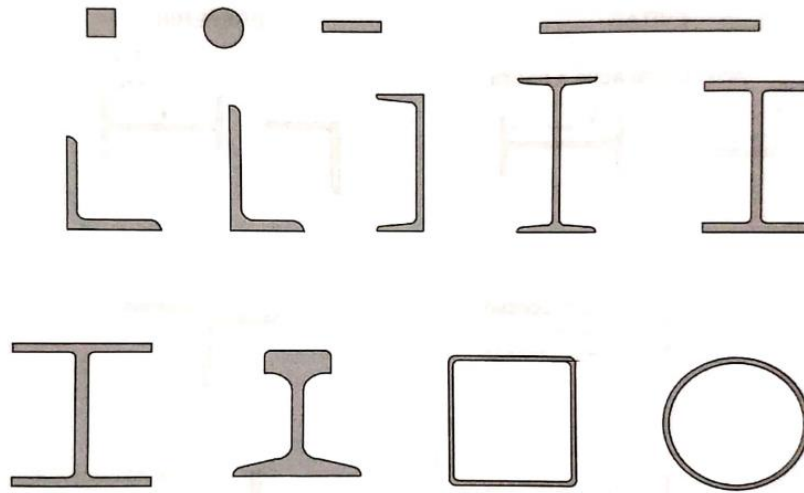
<b>TIPO DO AÇO</b>	<b>LIMITE ESCOAMENTO (MPa)</b>	<b>LIMITE RUPTURA (MPa)</b>
ASTM A 36	250	400-550
ASTM A 572 G50	345	450
NBR 6650 CF - 26	260	410

**Fonte:** Adaptado do catálogo Gerdau (2019)

## 2.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DO PERFIL DO TIPO I LAMINADO

Os principais tipos de produtos siderúrgicos no Brasil se apresentam na Figura 5. Um perfil laminado pode ser identificado através das suas dimensões externas nominais, seguidas da massa do perfil em função da sua massa por metro linear (Kg/m) (PFEIL; PFEIL, 2009).

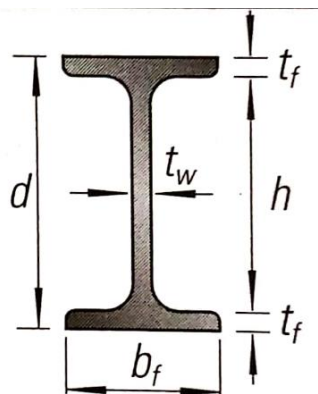
**Figura 5** - Perfis siderúrgicos mais utilizados no Brasil



Fonte: Adaptado (PFEIL; PFEIL, 2009).

O perfil proposto para a seleção é do tipo I laminado, por conta disso neste item serão abordados seus aspectos geométricos que definem suas características de cálculo. Seus principais parâmetros geométricos são: largura da mesa ( $b_f$ ), espessura da mesa ( $t_f$ ), espessura da alma ( $t_w$ ), altura da alma ( $h$ ) e altura do perfil ( $d$ ) e estão expostos na Figura 6.

**Figura 6** - Perfil I laminado (parâmetros geométricos)



Fonte: Adaptado (PINHEIRO, 2015).

Os valores referentes aos parâmetros geométricos dos perfis comerciais, estão dispostos em catálogos dos fabricantes. Neste presente trabalho o catálogo escolhido foi o de Perfis Estruturais Gerdau: Tabela de Bitolas, que pode ser encontrado no site da fabricante Gerdau.

### 2.3 ESTRUTURAS METÁLICAS

As estruturas metálicas tiveram surgimento em grande escala no ano de 1750. No Brasil, essa técnica veio a aparecer no cenário da engenharia nacional, no ano de 1812. Este ano foi um marco no avanço estrutural, sendo que a utilização do aço em larga escala, proporcionou a criação de grandes siderúrgicas, como exemplo a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), que entrou em atividade no ano de 1946. Essa atividade já corresponde à números expressivos de toneladas de aço fabricados (PFEIL; PFEIL, 2009).

Seus principais ramos de aplicação estão descritos abaixo:

- a) Edifícios industriais e comerciais;
- b) Coberturas e telhados;
- c) Estrutura de máquinas e caldeiras de vapor;
- d) Hangares e galpões industriais;
- e) Torres, guindastes, pontes rolantes e equipamentos de transporte;
- f) Pontes, viadutos e passarelas.

### 2.3.1 Vantagens

As principais vantagens segundo Pinheiro (2015) são:

- Fabricação de estruturas de precisão milimétrica, o que corrobora uma alta qualidade do produto acabado;
- Garantia de corretas dimensões e mantimento das propriedades dos materiais;
- Resistência à Choques Mecânicos e Vibrações;
- Quando mão de obra qualificada, garantia de obras mais rápidas e limpas;
- Possibilita na maioria dos casos a desmontagem da estrutura para posterior montagem em outro lugar;
- Por conta da grande resistência estrutural, permite projetos com grandes vãos, aumentando espaço útil e tornando a estrutura mais leve.

### 2.3.2 Desvantagens

Também segundo Bragança Pinheiro (2015) no mesmo título, as principais desvantagens, são:

- Limitação em execução de montagem em fábrica, por conta da complexa logística até o local da obra;
- Necessidade de tratamento superficial dos elementos contra a oxidação, devido ao contato com a atmosfera;
- Necessidade de mão de obra especializada para a fabricação e montagem das estruturas;
- Limitação de fornecimento dos perfis de aço.

## 2.4 NORMA NBR 8800:2008

As entidades normativas são associações que representam uma classe ou um órgão oficial, que determinam os procedimentos a serem seguidos para a execução de determinadas atividades. No caso de projeto de estruturas metálicas, são normalizados todas as características mecânicas e químicas dos materiais, a metodologia para o cálculo estrutural e o detalhamento de projeto (PINHEIRO, 2015).

No Brasil a norma segue o padrão de unidade no SI (Sistema Internacional de Unidades), nos desenhos e medidas lineares aplica-se o milímetro. A entidade normativa no Brasil é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e especificamente para projetos de estruturas metálicas a norma NBR 8800:2008 que teve sua primeira edição em 14 de abril de 1986, cujo o nome ainda era NB-14 e seu título: “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites) – ABNT.” (PINHEIRO, 2015).

## 2.5 SISTEMAS ESTRUTURAIS EM AÇO

Neste tópico seram apresentados os diferentes sistemas e elementos que compõem as estruturas metálicas.

### 2.5.1 Elementos Estruturais

Os principais elementos estruturais em aço de acordo com Pfeil (2009), são:

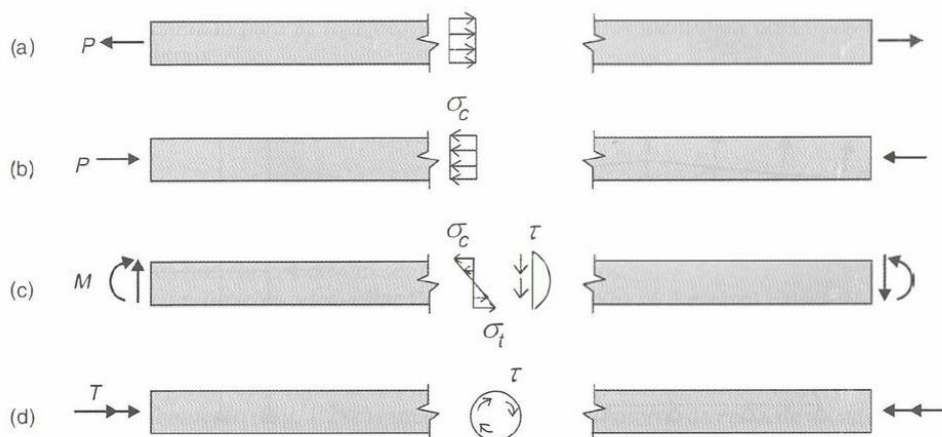
- Elementos lineares alongados chamados de hastes ou barras;
- Elementos bidimensionais chamados de elementos planos, constituídos por barras ou chapas.

As hastes são elementos alongados, onde suas dimensões transversais são pequenas em relação ao comprimento. Estes elementos se classificam de acordo com Pfeil (2009) como:

- Tirante: recebem carga na forma de tração axial;
- Colunas ou escoras: recebem carga na forma de compressão axial;
- Vigas: recebem cargas transversais as quais produzem momento fletor e esforço cortante;
- Eixos: recebem carga de torção.

Quando a haste recebe cargas de tração ou compressão que agem na direção do eixo mais alongado do elemento, as tensões internas de tração e compressão se distribuem de forma uniforme pela seção transversal do elemento. Porém, quando a haste é sujeita a cargas de tração ou compressão na direção normal ao eixo de maior dimensão, então os esforços predominantes são momentos fletores e esforços cortantes, os quais produzem tensão normal e de cisalhamento na seção transversal do elemento, e se distribuem de forma a dividir a tensão entre a linha neutra. Na Figura 7 encontram-se os perfis de tensão na haste para cada reação interna. (PFEIL; PFEIL, 2009).

**Figura 7** - Tipos de hastes em função da solicitação



**Fonte:** Adaptado (PFEIL; PFEIL, 2009).

As placas são elementos de espessura pequena em relação à largura e comprimento. As placas podem ser utilizadas separadamente ou em uma montagem como elemento constituinte de sistemas planos ou espaciais (PFEIL; PFEIL, 2009).

### 2.5.2 Sistema Planos Formados Por Elementos Lineares

Os sistemas de elementos lineares são formados pela junção dos principais elementos lineares: tirante, colunas e vigas. O que constituem as estruturas portantes em estruturas. Os principais sistemas planos são: treliças, grelhas e pórticos planos. As treliças são geralmente utilizadas em coberturas de estruturas metálicas. Neste sistema, as hastes trabalham geralmente em tração e compressão simples. Na prática as treliças apresentam nós rígidos, o que causa um aparecimento de momento fletor nas hastes, todavia esse elemento linear é esbelto e a ação do momento fletor resulta pequena. A grelha plana é composta por duas linhas de vigas, ortogonais ou oblíquas, que suportam cargas compostas que atuam na direção perpendicular ao plano. Este sistema é predominantemente usado em pisos de edifícios e superestruturas de pontes (PFEIL; PFEIL, 2009).

Os pórticos são sistemas formados pela montagem de várias hastes com uniões rígidas entre si. Esse grau a menos de liberdade, tem a função de impedir rotações e translações nas extremidades (KASSIMALI, 2016).

### 2.5.3 Comportamento Das Ligações

O funcionamento de sistemas estruturais em aço depende completamente do comportamento das ligações, pois como foi visto anteriormente, os elementos estruturais são formados pela junção dos elementos lineares de primeira ordem. Para que o sistema se mantenha travado, existe um conceito de ligações ideais, segundo Pfeil (2009). Essas ligações formam sistemas perfeitamente rígidos com zero grau de liberdade e também sistemas com rótulas, o qual não absorvem momentos fletores provocados pela ação das cargas, tornando o sistema com um grau de liberdade (PFEIL; PFEIL, 2009).

### 2.5.4 Estruturas Aporticadas Para Edificações

Compreende-se por associação de vários pórticos o qual o esquema estrutural depende do tipo de detalhe selecionado para as ligações viga-pilar. Dois tipos básicos são identificados por Chamberlain, 2013:

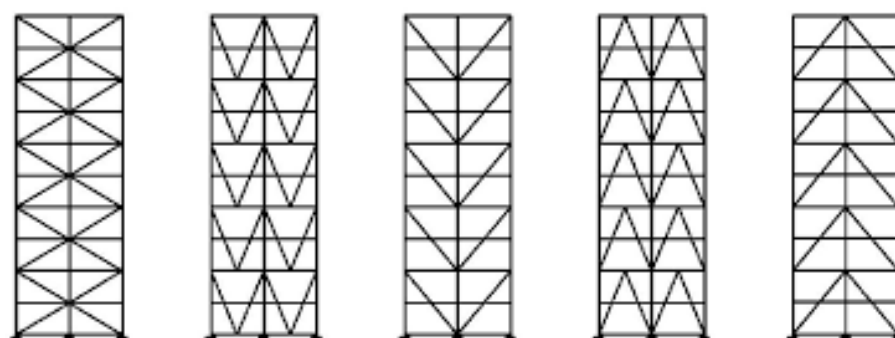
- Pórtico com ligações rígidas;
- Estrutura contraventada com ligações flexíveis, rotuladas nos vértices.

Segundo Pfeil (2009) os pórticos rígidos são estruturas estáveis para ações de cargas verticais e horizontais. Sua rigidez lateral está associada à rigidez de flexão dos elementos (pilares e vigas) que o compõem e os deslocamentos verticais devem ser sempre pequenos.

Já os pórticos flexíveis são estáveis apenas para cargas verticais, sua rigidez lateral é toda responsável pelos pilares, que atuam isolados (sem função de pórtico), por conta disso para a rigidez horizontal existir, deve-se empregar uma estrutura rígida para flexão, cujo nome é contraventamento, que pode ser composta por uma ou mais paredes de cisalhamento. As ligações flexíveis têm um custo de instalação bem reduzido, quando comparado a uma estrutura rígida. Porém, existe a necessidade de instalação de um elemento de rigidez horizontal, o que eleva o custo e aumenta-se o peso da estrutura, concentrando forças verticais na fundação do terreno (CHAMBERLAIN, 2013).

Os contraventamentos, Figura 8, devem ser utilizados para edifícios de pequeno porte, caso estejam submetidos às ações de vento ou apresentem grande esbeltez, já para edifícios de grande porte e múltiplos andares, os contraventamentos devem ser considerados parte primordial do projeto devido aos deslocamentos horizontais provocados pelo vento que o edifício poderá sofrer em sua vida útil devido à utilização e vento (MATOS, 2014).

**Figura 8** - Sistemas de Contraventamento



Fonte: Adaptado (MATOS, 2014).

## 2.6 MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES (PROCEDIMENTO DE CÁLCULO)

Para caracterização do método, entende-se estados limites sendo a ruptura mecânica de um elemento estrutural, ou até mesmo seu deslocamento excessivo, que torna a estrutura inutilizável. Este método incorpora os estados elástico e plástico na formação de mecanismos nas peças estruturais (PINHEIRO, 2015).

Segundo Pfeil (2009) os estados limites últimos se associam ao aparecimento de forças excessivas na qual levam a estrutura ao colapso, devido, por exemplo, a:

- Perda de equilíbrio como um corpo rígido;
- Plastificação total de um elemento ou uma seção estrutural;
- Ruptura de uma seção ou ligação;
- Flambagem em regime elástico ou plástico;
- Ruptura por fadiga.

De acordo com a norma NBR 8800:2008, o método dos estados-limites, utilizado para o dimensionamento de uma estrutura metálica, exige que nenhum estado-limite aplicável seja



ultrapassado quando a estrutura estiver sofrendo todas as combinações de ações possíveis. Se qualquer estado-limite aplicado à estrutura for excedido, caracteriza o não atendimento do seu dimensionamento, e a estrutura passa a ser inapropriada para utilização (CHAMBERLAIN, 2013).

### 2.6.1 Tração de Barras

Peças tracionadas são aquelas que estão sujeitas a solicitações de tração axial ou tração simples. Estas peças são utilizadas em estruturas metálicas, sob várias formas: tirantes, contraventamento de torres, travejamento de vigas ou colunas, tirante de vigas armadas ou barras tracionadas de treliça (PFEIL; PFEIL, 2009).

Um elemento estrutural sujeito à tração apresenta uma distribuição de tensão diferente, devido a forma de fixação das suas extremidades. Nas seções abertas em regime elástico, elevados níveis de concentração de tensão são observados, porém em regime plástico, a distribuição de tensão é uniforme, em razão da ductibilidade dos aços. Dessa maneira a força normal de tração de cálculo a ser considerada no dimensionamento, exceto para barras redondas ou barras com extremidades rosqueadas ou ligadas por pinos, é o menor valor obtido, considerando os estados-limite de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida (CHAMBERLAIN, 2013).

- Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Equação 1})$$

- Ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$N_{t,Rd}$  – Força normal de tração resistente de cálculo;

$A_g f_y$  – Produto entre a área bruta da seção transversal da barra com a resistência de escoamento do aço;

$A_{befu}$  – Produto entre a área líquida efetiva da seção transversal da barra e a resistência à ruptura do aço;

$\gamma_{a2}$  – Coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10 para escoamento da seção bruta e 1,35 para ruptura da seção líquida.

De acordo com a NBR 8800:2008 peças cuja extremidade da barra é rosqueada, devem ter diâmetro igual ou superior a 12 mm ou (1/2”), onde o diâmetro externo da rosca é igual ao diâmetro nominal da barra, tal qual o dimensionamento é feito pela ruptura e é dado por:

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{befu}}{\gamma_{a2}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$$A_{be} = 0,75 \cdot (0,25 \cdot \pi \cdot \varnothing_{parafuso}^2) \text{ e } \gamma_{a2} = 1,35$$

## 2.6.2 Compressão de Barras

Elementos estruturais que estão sob compressão, apresentam distribuição de tensão constante, quando carregados. O colapso desses elementos se dá por instabilidade ou flambagem provocados por flexão. Treliças, travejamentos, sistemas contraventados de edifícios, colunas de edificações de qualquer porte, são os elementos mais comuns que atuam sob compressão. A instabilidade pode ocorrer entre as extremidades, que é denominada de flambagem global, ou pode se localizar em pontos específicos da barra, onde se caracteriza por flambagem local. Esta última ocorre pelo aparecimento de flechas transversais à chapa (elemento de seção), onde se formam ondulações. O índice de esbeltez da barra ou da chapa é o fator determinante para o limite de resistência à flambagem local (CHAMBERLAIN, 2013).

De acordo com a norma NBR 8800:2008, a resistência de cálculo dos elementos que estão sob compressão axial, sujeitos à flambagem por flexão e flambagem local, deve atender a condição abaixo:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$N_{c,Ed}$  – é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  – é a força axial de compressão resistente de cálculo.

A força axial de cálculo  $N_{c,Ed}$ , é o valor obtido pelo cálculo considerando todas as possíveis ações que ocorrem na estrutura, ou seja, todos os possíveis estados-limite acometidos perante a vida útil da mesma. Porém, a força axial resistente à solitação de compressão  $N_{c,Rd}$ , associadas aos estados limites que aparecem como flexão, torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela equação, normalizada pela NBR 8800:2008.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$\chi$  – é o fator de redução total associado à resistência à compressão;

$Q$  – é o fator de redução total que está associado à flambagem local;

$\gamma$  – é o coeficiente de ponderação de resistência, igual a 1,10.

Para o cálculo do fator de resistência à compressão  $\chi$ , dois casos devem ser considerados, de acordo com a NBR 8800:2008.

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5 \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (\text{Equação 7})$$

Para o cálculo do índice de esbeltez reduzido, a norma NBR 8800: 2008 recomenda que ele seja determinado em função do fator de redução total associado à flambagem  $Q$ , através da equação abaixo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$N_e$  – é a força axial de flambagem elástica.

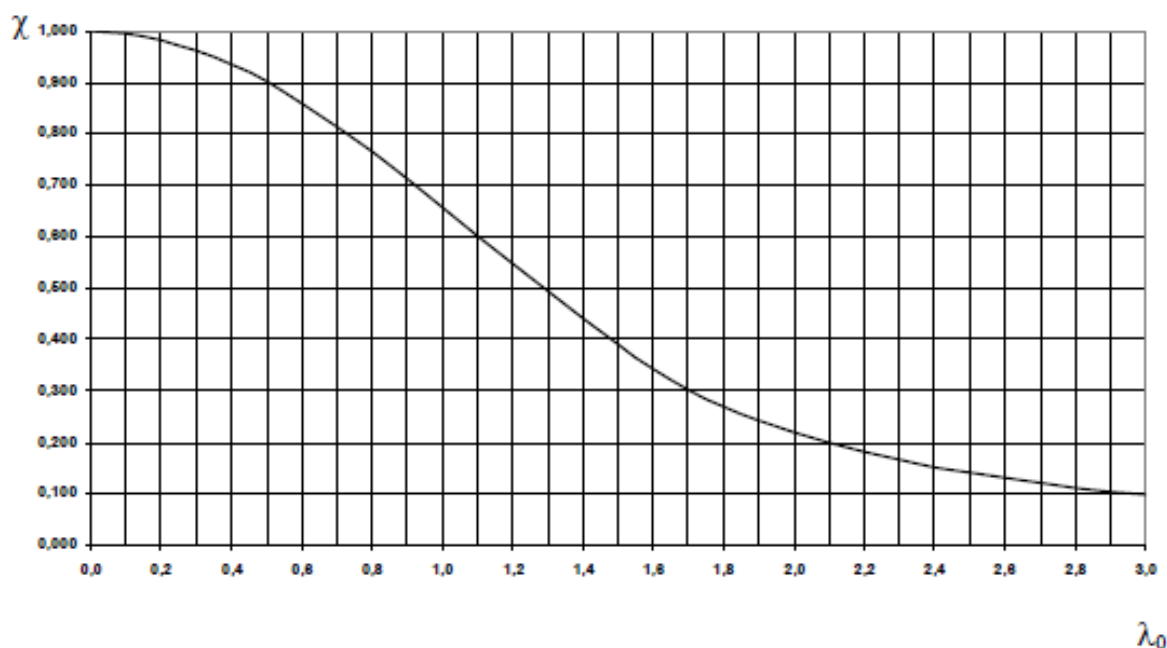
O fator de redução total associado à flambagem local é definido pela norma através do anexo F da ABNT NBR 8800:2008. A qual faz várias associações com diferentes tipos de seção. Porém, quando os elementos se encontram abaixo dos valores do limite de esbeltez, considera-se  $Q$  como 1,0.

O índice de esbeltez limite  $(b/t)_{lim}$  para o dimensionamento à compressão, é dado por:

$$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Equação 9})$$

A mesma norma NBR 8800:2008 apresenta um gráfico para o valor do fator de redução à resistência à compressão  $\chi$ , para casos em que o índice de esbeltez  $\lambda_0$  não ultrapasse 3,0.

**Diagrama 2** - Valor de Kappa em função do índice de esbeltez reduzido



**Fonte:** Adaptado de ABNT NBR 8800(2008).

Por fim, a norma NBR 8800:2008 sugere a verificação das forças axiais de flambagem elástica, considerando que a barra inicialmente reta se mantém com deslocamentos laterais nulos, até que o valor do carregamento atinja a carga crítica de flambagem. Assim a norma destaca as 3 possíveis relações:

- Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{Equação 10})$$

- Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{Equação 11})$$

- Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (\text{Equação 12})$$

- Raio de giração:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde o coeficiente K de comprimento de flambagem é exposto pelo Quadro 1:

**Quadro 1** - Coeficiente K de comprimento de flambagem

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de $K_x$ ou $K_y$	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800(2008).

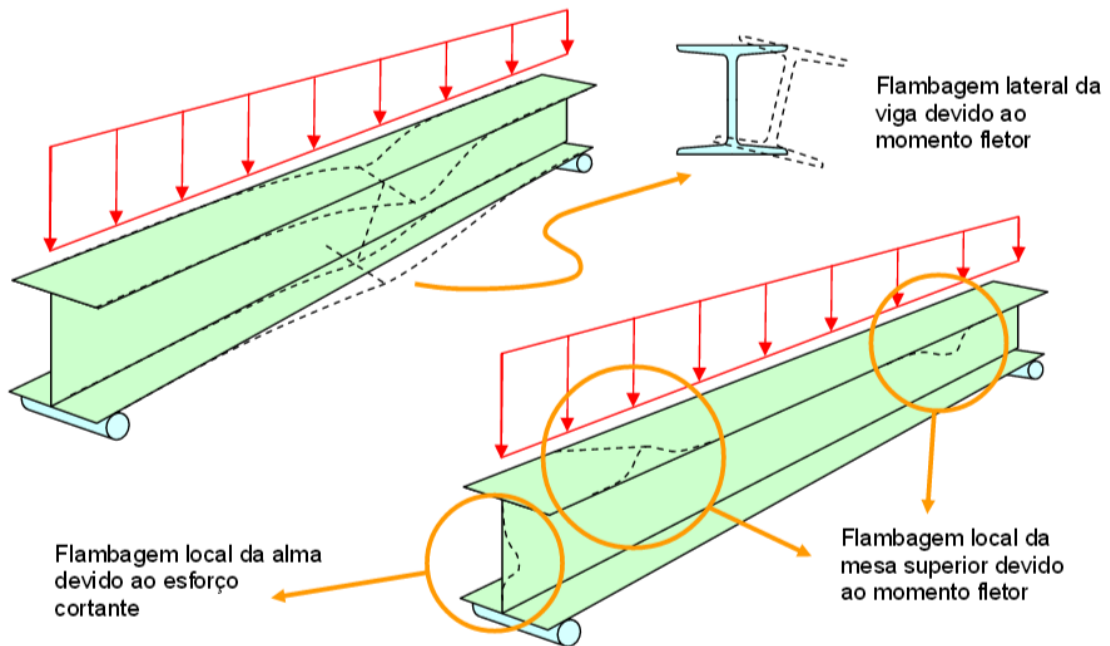
### 2.6.3 Flexão de Barras

Vigas que estão sujeitas à flexão simples, encontra-se como resposta ao carregamento, os esforços cortantes e o momento fletor resistentes de projeto, para que com isso realize uma comparação com os esforços solicitantes de projeto. Além disso, as flechas geradas pelas combinações de ações da estrutura devem ser verificadas (CHAMBERLAIN, 2013).

A definição da resistência à flexão das vigas, segundo a norma NBR 8800:2008, é dada pelo menor valor calculado pelas verificações abaixo, ilustradas na Figura 9:

- Flambagem local da alma: redução da resistência à flexão devido a perda de estabilidade das chapas comprimidas do elemento;
- Flambagem local da mesa: redução da resistência à flexão devido a perda da estabilidade das chapas do elemento;
- Flambagem lateral combinada por torção: redução da resistência à flexão devido à perda de equilíbrio no plano principal de flexão, cujo apresenta deslocamentos laterais e rotação devido à torção.

**Figura 9** - Tipos de flambagens sujeitas em uma viga de alma cheia



**Fonte:** Adaptado de (SARDÁ, 2018).

De acordo com a norma NBR 8800:2008, para determinar as dimensões das vigas de alma cheia, submetidas a carregamentos de flexão simples, devem-se verificar os parâmetros de esbeltez limites:

- Para flambagem lateral com torção;
- Correspondente à plastificação;
- Correspondente ao início do escoamento.

O momento fletor correspondente ao início do escoamento, não representa a capacidade total da seção da viga. A solicitação do momento pode ser aumentada, porém a tensão passa a não ser linear, esse aumento pode ocorrer até a zona de plastificação da seção. Nesse momento, a plastificação total será atingida e grandes rotações surgirão na seção. As instabilidades locais podem ser classificadas por três tipos de seções: compacta, semicompacta e esbelta. A inserção da viga em cada classe é definida pelos parâmetros de esbeltez, nomeados pela NBR 8800:2008 de  $\lambda$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_r$ , onde:

$$\begin{array}{ll} \lambda \leq \lambda_p & \text{Seção compacta} \\ \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r & \text{Seção semicompacta} \end{array}$$

$$\lambda > \lambda_p$$

Seção esbelta

A norma NBR 8800:2008 estabelece um memorial de cálculo para dimensionamento dos perfis solicitados por momento fletor e esforços cortantes. As equações 14 a 35 e o Quadro 2 são necessários para o cálculo destes estados limites aplicáveis aos perfis do tipo I.

a) Verificação ao momento fletor:

- No dimensionamento, deve ser atendida a condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad \text{(Equação 14)}$$

- Requisito primeiro:

$$M_{Rd} \leq \frac{1,50Wf_y}{\gamma_{a1}} \quad \text{(Equação 15)}$$

- Para o estado-limite de Flambagem Lateral com Torção (FLT), o momento resistente de cálculo é dado por:

Seção compacta	$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$	(Equação 16)
----------------	---------------------------------------	--------------

Seção semicompacta	$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right]$	(Equação 17)
--------------------	--	--------------

Seção esbelta	$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$	(Equação 18)
---------------	---	--------------

- Para os estados-limites de Flambagem Lateral da Mesa e da Alma (FLM e FLA), o momento resistente de cálculo é dado por:



Seção compacta 
$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Equação 19})$$

Seção semicomcompacta 
$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \quad (\text{Equação 20})$$

Seção esbelta 
$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Equação 21})$$

**Quadro 2** - Parâmetros de cálculo referentes ao momento fletor resistente

Tipos de seção e eixo de flexão	Estados-limite aplicável	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitos a momento de torção	FLT	$(f_y - \sigma_y)W$	Equação 23	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Equação 22
	FLM	$(f_y - \sigma_y)W$	Equação 23	$\frac{b}{t}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Equação 22
	FLA	$f_y W$	N/A	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptado de NBR 8800(2008)

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{Equação 22})$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (\text{Equação 23})$$

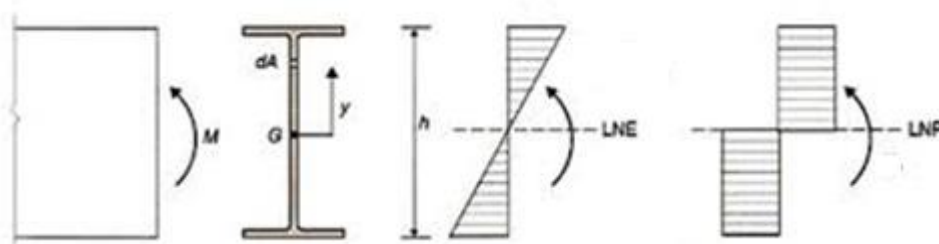
$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_y)W}{EJ} \quad (\text{Equação 24})$$

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)}{4} \quad (\text{Equação 25})$$

$$M_{pl} = Zf_y \quad (\text{Equação 26})$$

As barras sujeitas à flexão simples tem distribuição linear de tensões normais, que variam de um máximo de tração em uma das faces e um máximo de compressão na face oposta analisada, ilustrada na Figura 10.

**Figura 10** - Plastificação total da seção



Fonte: Adaptado (NETO, 2016).

b) Verificação à força cortante:

- Para seções I, H e U fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma:

Seção compacta 
$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Equação 27})$$

Seção semicompacta 
$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} \quad (\text{Equação 28})$$

Seção esbelta 
$$V_{Rd} = 1,24 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{Equação 29})$$

- Parâmetros de cálculo referentes à força cisalhante:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{Equação 30})$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (\text{Equação 31})$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (\text{Equação 32})$$

$$k_v = \begin{cases} 5,0 \text{ para alma sem enrijecedores transversais, } \frac{a}{h} > 3 \\ 5 + \frac{5}{(a/h)^2}, \text{ para os demais casos} \end{cases} \quad (\text{Equação 33})$$

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (\text{Equação 34})$$

$$A_w = dt_w \quad (\text{Equação 35})$$

#### 2.6.4 Barras Submetidas À Combinação de Esforços

Em um projeto real, as cargas atuantes nas estruturas se combinam, não atuando unicamente em cada ponto analisado. Por conta deste fato é necessária a verificação das barras prismáticas à combinação dos esforços atuantes. De acordo com o item 5.5.1 da NBR 8800:2008, para barras prismáticas submetidas a momentos fletores, força axial e forças cortantes são necessárias a verificação da simultaneidade da força axial de tração ou compressão com o momento fletor. Para isso têm-se as equações abaixo:

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{x,sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (\text{Equação 36})$$

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad \frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \left( \frac{M_{x,sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (\text{Equação 37})$$

## 2.7 COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA AS RESISTÊNCIAS

O coeficiente de ponderação da resistência é um parâmetro utilizado para a obtenção das resistências de cálculo. Este é obtido através da comparação entre os resultados analisados por corpos de prova e estruturas reais. A norma NBR 8800 indica os valores a serem adotados para cada situação e estão apresentados no Quadro 3, abaixo.

**Quadro 3** - Coeficientes de ponderação das resistências

Combinações	Aço estrutural <sup>a</sup>		Concreto $\gamma_c$	Aço das armaduras $\gamma_s$
	$\gamma_a$			
	Escoamento, flambagem e instabilidade $\gamma_{a1}$	Ruptura $\gamma_{a2}$		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

<sup>a</sup> Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800(2008)

## 2.8 OTIMIZAÇÃO

O conceito de aperfeiçoamento é antigo, porém o conhecimento sobre otimização é uma ciência nova a qual foi atribuída à problemas matemáticos por Albert Gauss com a aplicação dos métodos do gradiente e mínimos quadrados. Otimizar é encontrar a melhor solução para

um problema de acordo com uma medida quantitativa baseada na eficiência da variável proposta. Em outros termos, otimizar é encontrar a solução mais viável para um determinado projeto, ou seja, custo/benefício (IZMAILOV; SOLODOV, 2014).

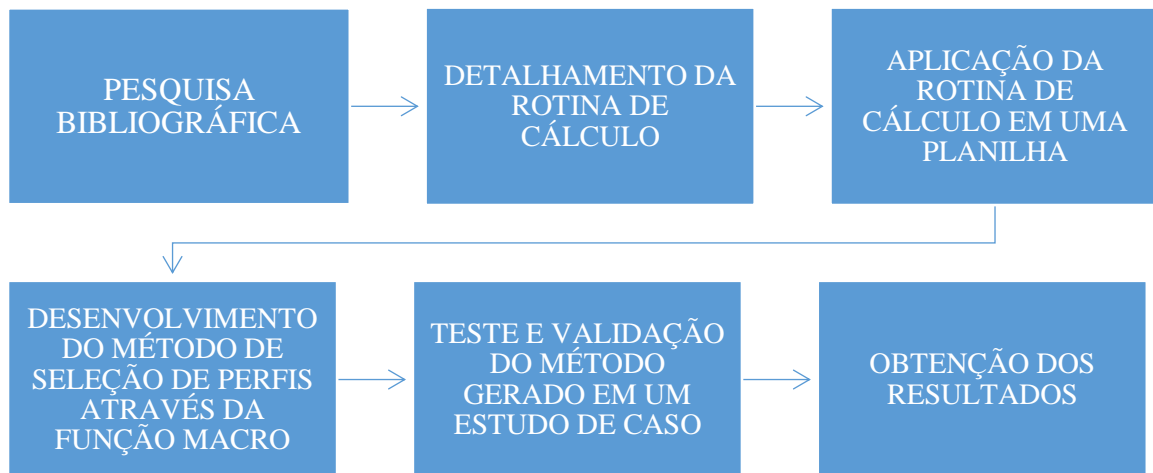
Naturalmente observa-se que a busca pelo ótimo é infinita, uma vez que, para processos reais sempre haverá limitantes a qual tornam o processo de otimização uma busca constante. Por conta disso, entende-se por ótimo como sendo a melhor condição possível, que seja favorável naquele momento para aquele projeto (FERREIRA, 2019).

### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o processo de implementação da planilha capaz de auxiliar na tomada de decisão na seleção de um perfil. Também, de descrever a rotina computacional implementada neste trabalho, explicitando suas funções e parâmetros, bem como a maneira em que deve ser realizado a inserções dos dados de cálculo para a seleção dos melhores perfis metálicos do tipo I laminado.

O trabalho foi desenvolvido através de um cronograma que teve início na pesquisa bibliográfica e seguiu uma rotina de tarefas até a obtenção dos resultados, que estão expostas no fluxograma abaixo.

**Fluxograma 1** – Delineamento do trabalho



**Fonte:** Autoria própria.

#### 3.1 PLANILHA DE CÁLCULO

O Excel é um programa de computador, desenvolvido pela empresa Microsoft, detentora da marca Office, o qual é possível realizar cálculos, desde os mais simples até resoluções mais complexas. Há recursos capazes de facilitar a criação de planilhas através de fórmulas, funções, equações e listas. Este foi escolhido para o desenvolvimento da rotina computacional, pois é de

fácil operação e é largamente utilizado por empresas de pequena o grande porte (SENAC-SP, 2019).

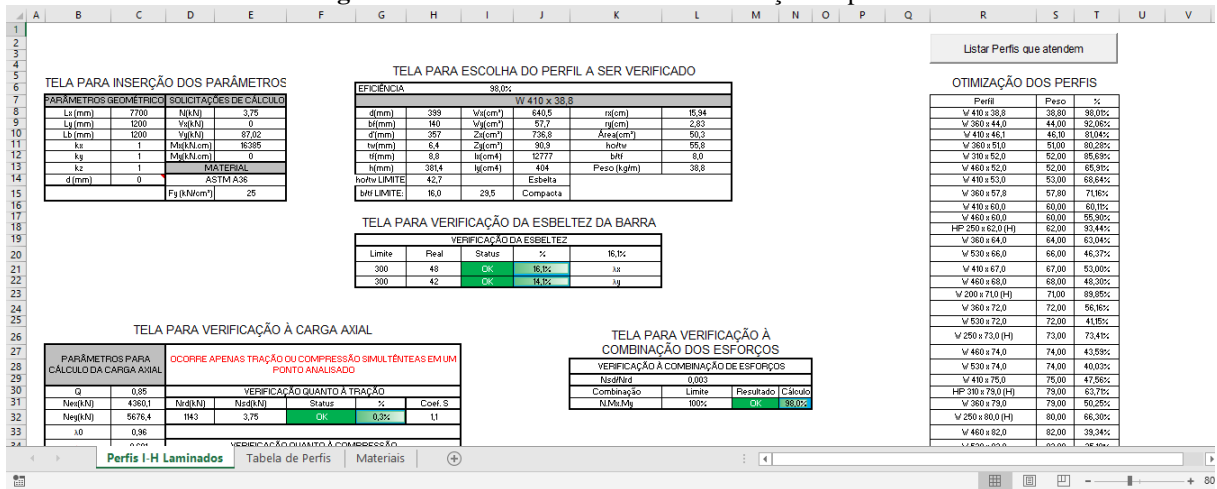
### **3.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE PERFIL**

Para a correta aplicação da rotina implementada, é importante que o leitor tenha domínio de como caracterizar todas as ações que atuam no elemento metálico a ser analisado. Para isso é indicado à utilização e conhecimento da norma NBR 8800:2008, onde consta a rotina para a definição das ações de cálculo, bem como as ações causadas pelo vento, a qual se atribui a norma NBR 6123. Realizar uma boa seleção preliminar dos elementos facilita na execução do desenho da estrutura e busca a otimização do projeto, que interpreta a escolha visando atender as necessidades de cálculo com menor peso da estrutura e menor custo de implantação. O método é baseado em uma rotina de cálculo e nos fluxogramas descritos pela norma NBR 8800, utilizada como referência.

### **3.3 PLANILHA DE SELEÇÃO DE PERFIS**

A tela inicial da planilha foi elaborada em três abas distintas, a primeira aba é de verificação e seleção de perfis, a segunda aba tem como função carregar uma biblioteca de perfis I do tipo laminado e a última aba para alimentar as macros e dados dos materiais. As abas: Tabela de Perfis e Materiais ficam ocultas ao usuário final, porém, podem ser reexibidas quando necessário. Com o intuito de apresentar uma usabilidade simples, essa estrutura foi utilizada e a tela final esta representada na Figura 11.

Figura 11 - Tela inicial da Planilha de seleção de perfis



Fonte: Autoria própria.

A aba de verificação dos perfis é o foco do desenvolvimento, e é nesta aba que se fazem os cálculos e recebem os resultados a partir das informações carregadas. Esta foi subdividida em pequenas tabelas a qual foi atribuído o nome de telas. As telas foram divididas conforme sua função requerida, a primeira delas e a mais importante é a tela para inserção dos parâmetros, que contém as tabelas para alimentar os parâmetros geométricos do elemento metálico, as solicitações de cálculo e o material que será utilizado.

Esta metodologia trás o benefício do usuário poder escolher um perfil da tabela de aços Gerdau e verificar suas resistências conforme seus parâmetros contrutivos e as cargas solicitantes. E também de alimentar os parâmetros de projeto e ter como resultado todos os perfis Gerdau que atendem às verificações das cargas solicitantes. A metodologia foi desenvolvida com essas duas respostas, a fim do engenheiro poder realizar a seleção do perfil conforme sua necessidade e garantindo a otimização da escolha, trazendo redução de custo através da seleção de perfis mais leves.

A planilha usada para aplicar o método desenvolvido está disponível em: <https://drive.google.com/open?id=1ktSB4Wc8cMF1KhmncPaZjhwg9a8xXcn9>.

### 3.4 BIBLIOTECA DOS PERFIS GERDAU DO TIPO I LAMINADO

A metodologia criada no Excel faz a verificação de perfis Gerdau do catálogo Açominas, o qual é largamente utilizado. Porém, se o usuário sentir a necessidade da utilização de outro



catálogo é necessário alimentar uma nova biblioteca em uma nova aba da planilha. Os dados foram alimentados manualmente copiando parâmetro a parâmetro na tabela. A biblioteca, apresentada na Figura 12, alimenta os dados necessários para realizar as verificações de perfis quanto à norma NBR 8800:2008. Para isso foi utilizado a função PROCV (Procura Valores) existente no Excel. Esta função procura um valor específico da célula de uma tabela e adiciona este valor na célula da outra tabela onde a função foi aplicada.

**Figura 12 - Biblioteca de perfis Gerdaul tipo I laminado**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	ESBELTEZ		
																																													ABA - λf	ABA - λw	Coef
BITOLA		MASSA LINEAR		ESPESSURA		h		ÁREA		PERIMETRO		EIXO X-X				EIXO Y-Y				rt		lt																									
mm x kg/m		kg/m		tw	tf	h	d'	cm²	u	Ix	Wx	rx	Zx	Iy	Wy	ry	Zy	cm	cm²	ABA - λf	ABA - λw	Coef																									
mm x kg/m		kg/m		mm	mm	mm	mm	cm²	cm	cm⁴	cm³	cm	cm³	cm⁴	cm³	cm	cm³	cm	cm²	bf/2t	d'/t	≤																									
4	W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	67	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,50	2,60	1,72	10,20	27,49																									
5	W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	69	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,50	2,69	4,34	7,18	20,48																									
6	W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	88	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,90	4,10	4,75	11,52	20,48																									
7	W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	69	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,80	2,73	11,08	4,95	17,48																									
8	W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	90	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,80	4,18	10,95	8,23	17,94																									
9	W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	91	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,40	4,22	20,58	6,64	14,67																									
10	W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	77	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,30	2,55	2,05	9,62	39,44																									
11	W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	79	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,90	2,59	4,02	7,85	29,31																									
12	W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	79	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,90	2,63	6,18	6,38	27,42																									
13	W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	92	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,30	3,54	7,65	7,92	29,34																									
14	W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	93	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,00	3,60	12,59	6,57	26,50																									
15	W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	103	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,00	4,50	14,51	8,09	25,90																									
16	W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	104	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,70	4,53	23,19	7,03	21,86																									
17	W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	119	4543	447,6	8,81	495,3	1.535	151,2	5,12	229,50	5,58	22,01	9,23	22,36																									
18	W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	119	5298	514,4	8,90	572,5	1.784	174,9	5,16	265,80	5,61	33,34	8,10	19,85																									
19	HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	120	4977	488,0	8,55	551,3	1.673	161,7	4,96	248,60	5,57	31,93	9,16	14,28																									
20	W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	120	6140	584,8	8,99	655,9	2.041	199,1	5,18	303,00	5,64	47,69	7,22	17,32																									
21	W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	122	7660	709,2	9,17	803,2	2.537	246,3	5,28	374,50	5,70	81,66	5,92	15,80																									
22	W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	123	9498	855,7	9,26	984,2	3.139	300,4	5,32	458,70	5,77	142,19	5,07	12,06																									
23	W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	88	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,80	2,48	2,54	9,53	45,92																									

Fonte: Autoria própria.

Abaixo segue um exemplo de aplicação da função, onde tras o valor da altura do perfil da biblioteca (aba Tabela de Perfis) para a tela de escolha do perfil a ser verificado na aba Perfis I-H Laminados.

$$=PROCV(G7;'Tabela de Perfis'!A:C;3;0)$$

### 3.5 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO

Os parâmetros construtivos se referem aos dados físicos da barra a ser verificada, os usuários devem estar atentos para definir quais serão os comprimentos Lx, Ly e Lb que se referem aos comprimentos destravados em seus respectivos eixos. Estes parâmetros influenciam diretamente em todo o cálculo para a verificação e para isso é indicado o entendimento da norma NBR 8800:2008.

As solicitações de cálculo são alimentadas após o usuário definir as cargas que serão aplicadas no elemento estudado. Para a carga axial, o usuário deve inserir a tração com sinal positivo e a compressão com sinal negativo. Para o momento fletor e as cargas cisalhantes não é necessário apresentar o sinal, pois as verificações trabalham com a magnitude. Em virtude disso o usuário deve ter conhecimento em resistência dos materiais para a correta análise dos resultados. A tela para inserção dos parâmetros está representada na Figura 13.

**Figura 13** - Tela para inserção dos parâmetros

### TELA PARA INSERÇÃO DOS PARÂMETROS

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS		SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO	
Lx (mm)		N(kN)	
Ly (mm)		Vx(kN)	
Lb (mm)		Vy(kN)	
kx	1	Mx(kN.cm)	
ky	1	My(kN.cm)	
kz	1	MATERIAL	
d (mm)	0	ASTM A572GR50	
		Fy (kN/cm <sup>2</sup> )	34,5

**Fonte:** Autoria própria.

A tela para escolha do perfil a ser verificado, representada na Figura 14, tem a função de buscar os valores dos parâmetros da biblioteca para o Excel realizar os cálculos necessários. O usuário tem a opção de indicar um perfil o qual deseja verificar as solicitações de cálculo, basta clicar no canto direito na célula onde contém o tipo do perfil, na imagem abaixo está representado pelo perfil W 360 x 32,9. Todos os perfis da biblioteca vão aparecer para serem selecionados, basta escolher que a planilha automaticamente já mostra a eficiência do perfil e todas as verificações quanto a norma NBR 8800. A eficiência mostrada representa o quanto o perfil resiste à combinação dos esforços solicitados, ou seja, deve ter um valor de 1% até 100% para perfis que atendem às solicitações e valores acima de 100% para perfis que não atendem às solicitações do projeto, mostrado pelas equações 36 e 37.

Figura 14 - Tela para escolha do perfil

## TELA PARA ESCOLHA DO PERFIL A SER VERIFICADO

EFICIÊNCIA		96,8%			
W 360 x 32,9					
d(mm)	349	Wx(cm <sup>2</sup> )	479	rx(cm)	14,09
bf(mm)	127	Wy(cm <sup>2</sup> )	45,9	ry(cm)	2,63
d'(mm)	308	Zx(cm <sup>2</sup> )	547,6	Área(cm <sup>2</sup> )	42,1
tw(mm)	5,8	Zy(cm <sup>2</sup> )	72	ho/tw	53,1
tf(mm)	8,5	Ix(cm <sup>4</sup> )	8358	b/tf	7,5
h(mm)	332	Iy(cm <sup>4</sup> )	291	Peso (kg/m)	32,9
ho/tw LIMITE:	36,3		Esbelta		
b/tf LIMITE:	13,7	25,1	Compacta		

Fonte: Autoria própria.

## 3.6 VERIFICAÇÕES DOS PERFIS QUANTO ÀS CARGAS SOLICITANTES

As telas de verificação foram criadas para mostrar aos usuários as solicitações do projeto e as resistências do perfil analisado, a fim de compara-los e trazer resultados quanto às verificações impostas pela NBR 8800:2008. Na Figura 15 encontra-se a verificação da esbeltez da barra nos eixos x e y, onde a norma impõe um limite máximo para cada altura de perfil e compara com a esbeltez calculada. O status se refere à verificação, se apontado como OK significa que o perfil atende à solicitação, caso contrário aparecerá um apontamento de NOK. A porcentagem remete ao quanto o real tem seu valor sobre o limite imposto pela norma, trazendo uma informação de eficiência do perfil.

Figura 15 - Tela de verificação quanto à esbeltez

## TELA PARA VERIFICAÇÃO DA ESBELTEZ DA BARRA

VERIFICAÇÃO DA ESBELTEZ				
Limite	Real	Status	%	
			18,2%	
300	55	OK	18,2%	lx
300	46	OK	15,2%	ly

Fonte: Autoria própria.

A tela para a verificação à carga axial, representada na Figura 16, traz os parâmetros utilizados para o cálculo das verificações no canto esquerdo da tabela, que foram inseridos através das equações 1 até 13. Para realizar as verificações o Excel busca os valores calculados e compara com as cargas inseridas na tela de solicitações de cálculo. Neste algoritmo há a

possibilidade de inserir apenas carga de tração ou de compressão, pois é feita a análise de um ponto, por conta disso a planilha verifica apenas a reação inserida pelo usuário. No exemplo apresentado na Figura 16 existe carga de tração, por conta disso aparece o valor N.A (não aplicável) nas células de verificação quanto à compressão. A eficiência se comporta igual para todas as verificações, ou seja, abaixo de 100% o perfil resiste às cargas solicitadas.

**Figura 16** - Tela para verificação quanto à carga axial  
**TELA PARA VERIFICAÇÃO À CARGA AXIAL**

PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA CARGA AXIAL		OCORRE APENAS TRAÇÃO OU COMPRESSÃO SIMULTÂNEAS EM UM PONTO ANALISADO				
Q	0,87	VERIFICAÇÃO QUANTO À TRAÇÃO				
Nex(kN)	2852,2	Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
Ney(kN)	4088,7	1320	3,75	OK	0,3%	1,1
$\lambda_0$	0,67	VERIFICAÇÃO QUANTO À COMPRESSÃO				
$\chi$	0,831	Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
r0(cm)	14,3	N.A	0	N.A	0,0%	1,1
Nez(kN)	6095,33	N.A	0	N.A	0,0%	1,1

**Fonte:** Autoria própria.

A tela para verificação à flexão, representada na Figura 17, realiza os cálculos dos três estados limites: flambagem lateral da alma (FLA), flambagem lateral da mesa (FLM) e flambagem lateral com torção (FLT) através dos índices de esbeltez calculado. As equações 14 a 26 e também os dados do Quadro 2 foram inseridos nesta tela para que a planilha execute os cálculos automáticos e compare com as solicitações de projeto. A verificação é feita para os eixos x e y e apresentam um status para representar se o perfil suporta as solicitações e qual a eficiência do mesmo para a condição adotada. Como nas outras verificações, se abaixo de 100% o perfil atende aos requisitos de projeto.

**Figura 17 - Tela para verificação à flexão  
TELA PARA VERIFICAÇÃO À FLEXÃO**

FLAMBAGEM LATERAL DA MESA				MOMENTO DE PLASTIFICAÇÃO				
EIXO X		EIXO Y		EIXO X		EIXO Y		
$\lambda_{mesa}$	7,47	$\lambda_{mesa}$	7,47	Mpl(kN.cm)	18892	Mpl(kN.cm)	2484	
$\lambda_p$	9,26	$\lambda_p$	9,26	MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO				
$\lambda_r$	24,18	$\lambda_r$	24,18	EIXO X		EIXO Y		
Mr	11567,85	Mr	1108,49	FLA	18892	FLA	1440	
COMPACTA		COMPACTA		FLM	18892	FLM	2484	
FLAMBAGEM LATERAL DA ALMA				$1,5 \cdot W \cdot F_y$	22535	$1,5 \cdot W \cdot F_y$	2159	
EIXO X		EIXO Y		VERIFICAÇÃO À FLEXÃO EIXO X				
$\lambda_{alma}$	57,24	$\lambda_{alma}$	57,24	Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	PONDERAÇÃO
$\lambda_p$	91,65	$\lambda_p$	27,30	16947	16385	OK	96,7%	1,1
$\lambda_r$	138,94	$\lambda_r$	34,13	VERIFICAÇÃO À FLEXÃO EIXO Y				
Mr	16525,50	Mr	1183,98	Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	PONDERAÇÃO
COMPACTA		ESBELTA		1440	0	N.A	0,0%	1,1
FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO				bef	22,9			
CÁLCULO		PARÂMETROS		ly	290,6			
$\lambda(lb)$	45,63	B1	0,0617	Wef	34,3			
$\lambda_p$	42,90	Mcr	71604,59					
$\lambda_r$	122,70	Mrd	16947,33					
Mr	11567,85	Mpl	18892,20					
SEMI-COMPACTA								

**Fonte:** Autoria própria.

A tela para verificação ao cisalhamento, representada na Figura 18, traz os cálculos dos parâmetros utilizados para a verificação do perfil escolhido. Foi inserida em cada célula a equação pertinente a cada cálculo. As equações 27 a 35 representam todos os parâmetros inseridos para a realização dos cálculos e com os resultados, automaticamente é feita a verificação quanto à capacidade do perfil em resistir às cargas solicitadas. O status representa se a verificação foi atendida e a eficiência, como nas outras verificações, representa o quanto a solicitação de cálculo pesa sobre a resistência do perfil escolhido, se abaixo de 100% o perfil atende às solicitações de cisalhamento.

**Figura 18 - Tela para verificação quanto ao cisalhamento  
TELA PARA VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO**

PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO ESFORÇO CISALHANTE				VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO EIXO X				
EIXO X		EIXO Y		Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	PONDERAÇÃO
$\lambda_{Mesa}$	7,47	$\lambda_{Alma}$	57,24	406	0	N.A	0,0%	1,1
$\lambda_p$	26,81	$\lambda_p$	59,96					
Aw	21,59	Aw	20,24	VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO EIXO Y				
Vrdx (kN)	406,28	Vrdy	380,92	Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	PONDERAÇÃO
kv	1	kv	5	381	87,02	OK	22,8%	1,1

**Fonte:** Autoria própria.

Por fim, a norma indica a verificação da combinação dos esforços atuantes e para isso a tela representada na Figura 19 realiza o cálculo para chegar ao resultado final da eficiência do perfil. Para que sejam atendidas as verificações de projeto, a eficiência deve ter um valor entre 1 a 100%, se o perfil obtiver uma eficiência acima de 100% não está apto a ser empregado para as condições de projeto inseridas no programa.

**Figura 19** - Tela para verificação quanto à combinação de esforços

**TELA PARA VERIFICAÇÃO À COMBINAÇÃO DOS ESFORÇOS**

VERIFICAÇÃO À COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS			
Nsd/Nrd		0,003	
Combinação	Limite	Resultado	Cálculo
N.Mx.My	100%	OK	96,8%

Fonte: Autoria própria.

### 3.7 OTIMIZAÇÃO DA SELEÇÃO DOS PERFIS DO TIPO I LAMINADO

A norma NBR 8800:2008 traz todas as ferramentas necessárias para realizar a verificação de perfis, porém deixa vaga como é feita a seleção destes. O usuário fica com uma informação incompleta e é obrigado a realizar um chute aproximado de um perfil para realizar as verificações. Com a tela de otimização dos perfis, apresentada na figura abaixo, o usuário terá a oportunidade de fazer uma seleção rápida e precisa de acordo com as verificações da NBR 8800 para o perfil a ser utilizado, com a combinação das cargas que atuam na estrutura proposta.

Essa tela funciona através do desenvolvimento de uma macro dentro da plataforma do Excel. Uma macro é uma sub-rotina que executa tarefas pré-programadas que são ativadas quando se clica em um botão específico.

Neste algoritmo, a macro utilizada pega todos os perfis encontrados na biblioteca (catálogo Gerdau) e realiza todas as verificações da norma NBR 8800 (expostos no item 3.6). Em seguida armazena o valor da eficiência de todos os perfis, aqueles que não atendem às solicitações de cálculo, são excluídos e os perfis que atendem à verificação são separados em uma tabela, apresentada na Figura 20. A macro também grava o valor do peso por metro linear do perfil, para servir de objeto de comparação na escolha, pois o aço é vendido através do preço por Kg/metro linear. Automaticamente a macro organiza em ordem decrescente os perfis, ou seja, aqueles que apresentam valores mais próximos de 100% (mais otimizados) até os valores mais próximos de 1% (menos otimizado). O usuário deve interpretar a eficiência como sendo o parâmetro que responde às verificações de projeto e traçar a sua escolha baseado também no peso por metro linear, fator que impacta diretamente no preço do produto/projeto.

**Figura 20** - Otimização dos perfis

Listar Perfis que atendem

### OTIMIZAÇÃO DOS PERFIS

Perfil	Peso	%
W 360 x 32,9	32,90	96,82%
W 310 x 38,7	38,70	85,01%
W 410 x 38,8	38,80	71,02%
W 360 x 39,0	39,00	78,74%
W 360 x 44,0	44,00	66,71%
W 310 x 44,5	44,50	73,40%
W 250 x 44,8	44,80	86,27%
W 410 x 46,1	46,10	58,73%
W 360 x 51,0	51,00	58,17%
W 200 x 52,0 (H)	52,00	91,34%
W 310 x 52,0	52,00	62,10%
W 460 x 52,0	52,00	47,76%
HP 200 x 53,0 (H)	53,00	94,85%
W 410 x 53,0	53,00	49,74%
W 360 x 57,8	57,80	51,56%
W 200 x 59,0 (H)	59,00	79,73%
W 410 x 60,0	60,00	43,56%

**Fonte:** Autoria própria.

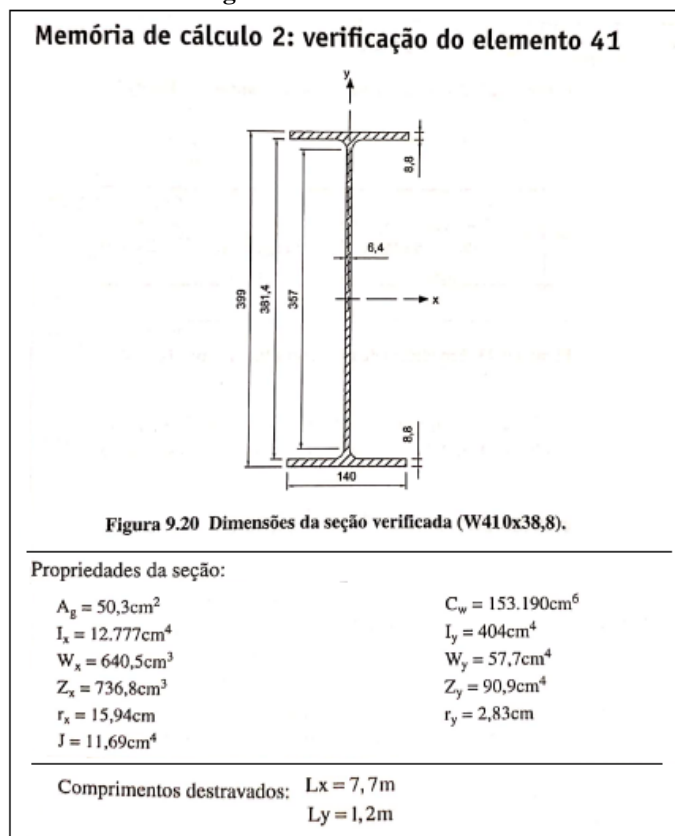
## 4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo será apresentada a aplicação do método proposto em um exemplo encontrado na literatura e as verificações serão confrontadas para validar a planilha adotada.

### 4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO

O método será aplicado para um exemplo exposto no livro: Estruturas de Aço do autor Zacarias Chamberlain na página 127 na memória de cálculo 2: verificação do elemento 41, ilustrado na Figura 21. Este caso aborda a verificação de um perfil W 410 x 38,8, porém o autor não deixa explícito o motivo de ter escolhido tal perfil. O diagrama de esforços solicitantes está exposto na Figura 22. Os comprimentos destravados  $L_x=7,7$  m,  $L_y=1,2$  m e  $L_b=1,2$  m, mostrado na Figura 23. O material utilizado pelo autor é o aço ASTM A572 GR50 e as solicitações de cálculo estão representadas na Figura 23.

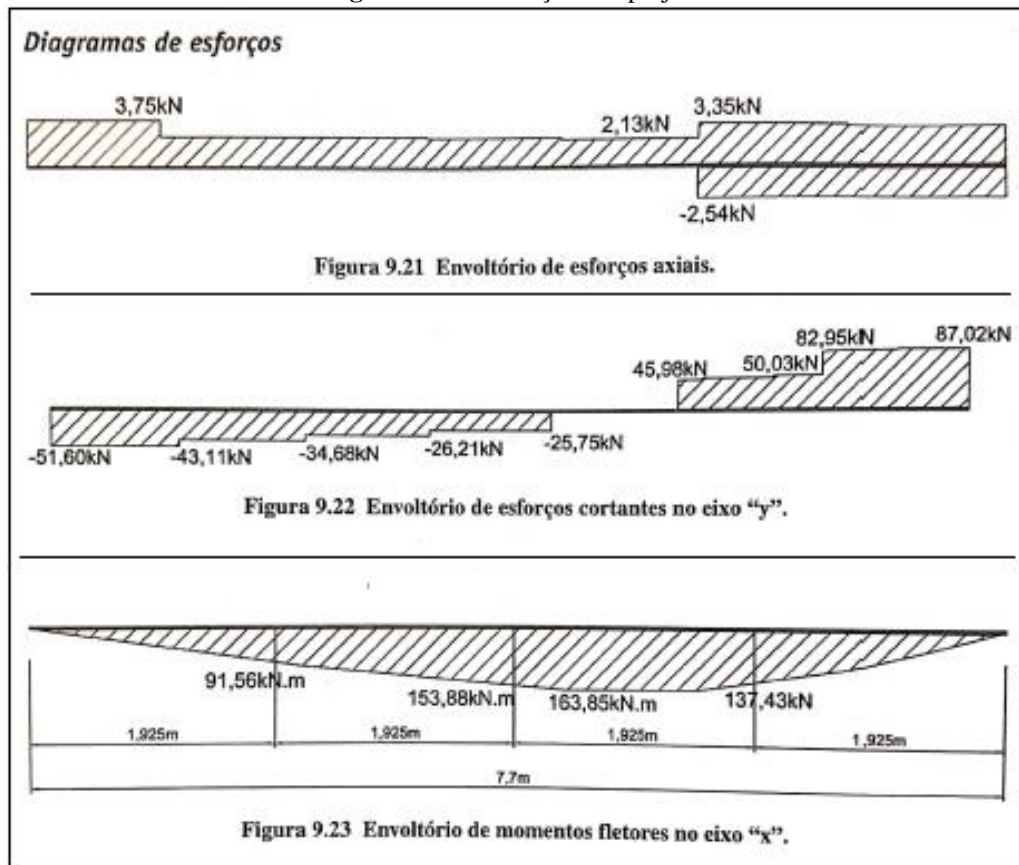
Figura 21 - Estudo de caso.



Fonte: Adaptado de (CHAMBERLAIN, 2013).



**Figura 22** - Solicitações do projeto.



Fonte: Adaptado de (CHAMBERLAIN, 2013).

**Figura 23** - Aplicação dos parâmetros de projeto

### TELA PARA INSERÇÃO DOS PARÂMETROS

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS		SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO	
Lx (mm)	7700	N(kN)	3,75
Ly (mm)	1200	Vx(kN)	0
Lb (mm)	1200	Vy(kN)	87,02
kx	1	Mx(kN.cm)	16385
ky	1	My(kN.cm)	0
kz	1	<b>MATERIAL</b>	
d (mm)	0	ASTM A572GR50	
		Fy (kN/cm <sup>2</sup> )	34,5

Fonte: Autoria própria.

O perfil utilizado pelo autor, bem como seus parâmetros construtivos e propriedades geométricas se encontram na Figura 22, recortada da planilha onde foi aplicado o método.

**Figura 24** - Parâmetros do perfil escolhido pelo autor**TELA PARA ESCOLHA DO PERFIL A SER VERIFICADO**

EFICIÊNCIA		71,0%			
W 410 x 38,8					
d(mm)	399	Wx(cm <sup>2</sup> )	640,5	rx(cm)	15,94
bf(mm)	140	Wy(cm <sup>2</sup> )	57,7	ry(cm)	2,83
d'(mm)	357	Zx(cm <sup>2</sup> )	736,8	Área(cm <sup>2</sup> )	50,3
tw(mm)	6,4	Zy(cm <sup>2</sup> )	90,9	ho/tw	55,8
tf(mm)	8,8	Ix(cm <sup>4</sup> )	12777	b/ff	8,0
h(mm)	381,4	Iy(cm <sup>4</sup> )	404	Peso (kg/m)	38,8
ho/tw LIMITE:	36,3		Esbelta		
b/ff LIMITE:	13,7	25,1	Compacta		

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 VERIFICAÇÃO QUANTO ÀS SOLICITAÇÕES DE PROJETO

Este tópico tras todas as verificações necessárias para validar o perfil proposto quanto à utilização no projeto requerido. Bem como a validação do método proposto, através do confronto dos resultados obtidos pelo autor.

### 4.2.1 Verificação Quanto À Esbeltez

A tela de verificação da esbeltez demonstra que o perfil proposto está apto neste requisito, pois seus valores reais ficam abaixo dos valores limites estipulados pela norma NBR 8800:2008, como mostrado na Figura 23 abaixo.

**Figura 25** - Verificação quanto à esbeltez**TELA PARA VERIFICAÇÃO DA ESBELTEZ DA BARRA**

VERIFICAÇÃO DA ESBELTEZ				
Limite	Real	Status	%	
300	48	OK	16,1%	λx
300	42	OK	14,1%	λy

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.2 Verificação Quanto À Carga Axial

No exemplo proposto a carga axial de projeto é de tração, por conta disso não é avaliado a compressão para este caso. Na Figura 24 seguem os parâmetros de verificação baseados na norma NBR 8800:2008, e indicam que o perfil escolhido está apto a ser adotado no projeto para este requisito.

**Figura 26** - Verificação quanto à carga axial  
**TELA PARA VERIFICAÇÃO À CARGA AXIAL**

PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA CARGA AXIAL		OCORRE APENAS TRAÇÃO OU COMPRESSÃO SIMULTÂNEAS EM UM PONTO ANALISADO				
Q	0,85	VERIFICAÇÃO QUANTO À TRAÇÃO				
Nex(kN)	4360,1	Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
Ney(kN)	5676,4	1578	3,75	OK	0,2%	1,1
$\lambda_0$	1,13	VERIFICAÇÃO QUANTO À COMPRESSÃO				
x	0,589	VERIFICAÇÃO QUANTO À COMPRESSÃO				
r0(cm)	16,2	Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
Nez(kN)	1164,67	N.A	0	N.A	0,0%	1,1

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.3 Verificação Quanto à Flexão

Para a verificação das cargas de flexão é necessário efetuar os cálculos dos estados limites de flambagem através da análise da esbeltez da seção. Para o caso proposto ocorre apenas flexão no eixo x, motivo pelo qual o momento solicitante de cálculo em y é tomado como zero. Na Figura 25 encontra-se a verificação realizada para o perfil proposto para as solicitações de projeto. Verifica-se que este está apto a ser utilizado, tendo uma eficiência de 70,9%.

**Figura 27 - Verificação quanto à flexão**  
**TELA PARA VERIFICAÇÃO À FLEXÃO**

FLAMBAGEM LATERAL DA MESA				MOMENTO DE PLASTIFICAÇÃO				
EIXO X		EIXO Y		EIXO X		EIXO Y		
λ <sub>mesa</sub>	7,95	λ <sub>mesa</sub>	7,95	Mpl(kN.cm)	25420	Mpl(kN.cm)	3136	
λ <sub>p</sub>	9,26	λ <sub>p</sub>	9,26	MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO				
λ <sub>r</sub>	24,18	λ <sub>r</sub>	24,18	EIXO X		EIXO Y		
Mr	15468,08	Mr	1393,46	FLA	25419,60	FLA	1809,68	
COMPACTA		COMPACTA		FLM	25419,60	FLM	3136,05	
FLAMBAGEM LATERAL DA ALMA				1,5*W*Fy	30132,61	1,5*W*Fy	2714,52	
EIXO X		EIXO Y		VERIFICAÇÃO À FLEXÃO EIXO X				
λ <sub>alma</sub>	59,59	λ <sub>alma</sub>	59,59	Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	PONDERAÇÃO
λ <sub>p</sub>	91,65	λ <sub>p</sub>	27,30	23108,727	16385,000	OK	70,9%	1,1
λ <sub>r</sub>	138,94	λ <sub>r</sub>	34,13	VERIFICAÇÃO À FLEXÃO EIXO Y				
Mr	22097,25	Mr	1489,70	Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	PONDERAÇÃO
COMPACTA		ESBELTA		1810	0	N.A.	0,0%	1,1
FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO				bef	25,5			
CÁLCULO		PARÂMETROS		ly	403,0			
λ(lb)	42,40	B1	0,0645	Wef	43,2			
λ <sub>p</sub>	42,90	Mcr	41777,86					
λ <sub>r</sub>	80,61	Mrd	23108,73					
Mr	15468,08	Mpl	25419,60					
COMPACTA								

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.4 Verificação Quanto Aos Esforços Cisalhantes

Para o caso proposto existem apenas cargas cisalhantes no eixo y, motivo que faz a solicitação de cálculo apresentada na figura abaixo ser zero. Os parâmetros de cálculo para a verificação quanto ao cisalhamento seguem os requisitos da norma NBR 8800. Neste caso o cisalhamento é baixo e o perfil está apto a ser utilizado no projeto, verifica-se uma eficiência de 18,1%, como mostrado na Figura 26 abaixo.

**Figura 28 - Verificação quanto ao cisalhamento**  
**TELA PARA VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO**

PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO ESFORÇO CISALHANTE				VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO EIXO X				
EIXO X		EIXO Y		Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	PONDERAÇÃO
λ <sub>Mesa</sub>	7,95	λ <sub>Alma</sub>	59,59	464	0	N.A.	0,0%	1,1
λ <sub>p</sub>	26,81	λ <sub>p</sub>	59,96					
A <sub>w</sub>	24,64	A <sub>w</sub>	25,54	VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO EIXO Y				
Vrdx (kN)	463,68	Vrdy	480,54	Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	PONDERAÇÃO
kv	1	kv	5	481	87,02	OK	18,1%	1,1

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.5 Verificação Quanto à Combinação dos Esforços

A combinação dos esforços solicitantes é o parâmetro principal que responde se o perfil está apto ou não para ser adotado no projeto. Neste exemplo, ao aplicar o método de cálculo mostrado no item 3 deste trabalho, verifica-se uma eficiência de 71% da seção, como explicitado na Figura 27, o que interpreta a aptidão e segurança do perfil para o projeto proposto.

**Figura 29** - Verificação quanto à combinação dos esforços

### TELA PARA VERIFICAÇÃO À COMBINAÇÃO DOS ESFORÇOS

VERIFICAÇÃO À COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS			
Nsd/Nrd	0,002		
Combinação	Limite	Resultado	Cálculo
N.Mx.My	100%	OK	71,0%

**Fonte:** Autoria própria.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico os resultados obtidos no desenvolvimento serão confrontados com os resultados expostos pelo autor para a validação do método. Ao final a tabela de otimização mostra que o autor não garante a melhor seleção do perfil quanto às combinações de cargas e parâmetros de projeto.

### 5.1 RESULTADOS

Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento dos cálculos mostram toda a verificação do perfil proposto na literatura e indicam a aptidão do mesmo em suportar as cargas de projeto. A verificação do algoritmo proposto tem seu reconhecimento ao trazer respostas próximas e de confiança quando confrontadas com a aplicação da literatura. A Tabela 2 abaixo traz os principais resultados encontrados no livro confrontado com os resultados encontrados na planilha executada.

**Tabela 2** - Validação dos resultados obtidos pelo método

PARÂMETRO	LITERATURA	MÉTODO (W410x38,8)	MÉTODO (W360x32,9)
Esbeltez real eixo x	48,3	48,31	54,65
Esbeltez real eixo y	42,4	42,40	45,63
$M_{FLT}$	23108,7 KN.cm	23108,73 KN.cm	16947,33 KN.cm
$M_{FLM}$	23108,7 KN.cm	25419,60 KN.cm	18892,20 KN.cm
$M_{FLA}$	23108,7 KN.cm	25419,60 KN.cm	18892,20 KN.cm
$M_{pl}$	25419,6 KN.cm	25419,60 KN.cm	18892,20 KN.cm
$M_{x,Rd}$	23108,7 KN.cm	23108,73 KN.cm	16947,33 KN.cm
$\frac{1,5W_x f_y}{\gamma_{a1}}$	30132,6 KN.cm	30132,61 KN.cm	25534,77 KN.cm
$V_{pl,y}$	527,8 KN	528,59 KN	419,01 KN
$V_{y,Rd}$	479,8 KN	480,54 KN	380,92 KN
Combinação	71%	71%	96,8%

Fonte: Autoria própria.

## 5.2 DISCUSÕES

Ao longo de todo o trabalho, foi possível acompanhar uma rotina de concepção de um método para a seleção de perfis do tipo I laminado conforme a norma NBR 8800:2008. E a validação do método foi feita através da aplicação de um exemplo da literatura na planilha de seleção proposta. Os resultados da planilha apresentaram uma divergência positiva em relação ao exemplo de comparação. A planilha se mostrou mais segura e eficiente nos cálculos, pois faz verificações mais completas quando comparado à literatura utilizada. As divergências encontradas mostram que o autor não emprega a resolução das equações com uma boa aproximação decimal tornando o método proposto mais refinado. A partir da tabela de otimização do perfil, pode-se chegar a um resultado mais expressivo na tomada de decisão na escolha da seção (perfil I laminado). A figura abaixo representa a tabela de perfis otimizados para o exemplo proposto, a qual mostra que o perfil escolhido pelo autor não é o mais eficiente e com menor peso por metro linear. São indicados dois perfis na ordem de preferência de escolha, o perfil W 360 x 32,9 e o perfil W 310 x 38,7 que apresentam uma maior eficiência e um menor peso por metro linear. Esses fatores são de extrema relevância e impactam direto no custo do material, tornando o método de seleção eficiente e apto a ser utilizado no cotidiano de um projetista.

**Figura 30** - Resultado da otimização para as combinações de projeto

Listar Perfis que atendem		
OTIMIZAÇÃO DOS PERFIS		
Perfil	Peso	%
W 360 x 32,9	32,90	96,82%
W 310 x 38,7	38,70	85,01%
W 410 x 38,8	38,80	71,02%
W 360 x 39,0	39,00	78,74%
W 360 x 44,0	44,00	66,71%
W 310 x 44,5	44,50	73,40%
W 250 x 44,8	44,80	86,27%
W 410 x 46,1	46,10	58,73%
W 360 x 51,0	51,00	58,17%
W 200 x 52,0 (H)	52,00	91,34%
W 310 x 52,0	52,00	62,10%
W 460 x 52,0	52,00	47,76%
HP 200 x 53,0 (H)	53,00	94,85%
W 410 x 53,0	53,00	49,74%
W 360 x 57,8	57,80	51,56%
W 200 x 59,0 (H)	59,00	79,73%
W 410 x 60,0	60,00	43,56%

**Fonte:** Autoria própria.



## 6 CONCLUSÃO

Esta parte tem a finalidade de analisar todo o desenvolvimento do trabalho e os resultados obtidos através da aplicação do método exposto. Também de realizar sugestões para futuros trabalhos a fim de refinar o método através da aplicação de novos perfis para a seleção.

Ao longo do trabalho foram apresentadas todas as ferramentas de análise da esbelteza e cálculo das cargas axiais, momentos fletores e esforços cortantes, indicados pela norma NBR 8800:2008. Também foram expostas as constantes mecânicas e as características dos perfis utilizados, a fim de informar os limites da aplicação do método. Com isso, notou-se uma grande variedade nas formas de cálculo para verificação e validação de perfis metálicos, tornando parte do problema para a seleção de seções a serem utilizadas em um projeto.

Quanto à rotina computacional desenvolvida, é avaliada de forma positiva e com o objetivo atendido, uma vez que, é capaz de determinar a resistência de todos os perfis com suas variedades de combinação de esforços e construções físicas, a fim de obter uma correta seleção do perfil I laminado, como mostrado no item 5.1 deste trabalho. É importante ressaltar que a biblioteca de perfis deve ser mantida atualizada, para que o algoritmo continue gerando respostas precisas para perfis que realmente estejam sendo utilizados e fornecidos para projetos reais.

A ferramenta de otimização de seleção de perfis é eficaz e objetiva, uma vez que, traz a ordem decrescente dos melhores perfis a serem escolhidos. Porém limita-se apenas a perfis I laminados do catálogo Açominas, deixando uma brecha para trabalhos futuros a fim de refinar o método. Dentro de todos os limites, a metodologia pode ser aplicada com segurança e deve ser difundida entre todos aqueles que trabalham e pesquisam acerca de estruturas metálicas, independente da aplicação envolvida.

### 6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O método desenvolvido tem seu limite de aplicação a apenas perfis laminados do tipo I encontrados no catálogo Açominas Gerdau. Para trabalhos futuros, sugere a inserção de novas bibliotecas e novas telas a fim de verificar perfis tubulares, perfis do tipo C e cantoneiras, de acordo com a norma NBR 8800:2008, os quais são largamente utilizados na indústria metal/mecânica.

Como outra forma de replicabilidade, sugere-se a transformação da planilha executada via Excel para uma linguagem de programação mais robusta a qual garante menor vulnerabilidade para o software desenvolvido, a linguagem Python apresenta boas características para isso. Com isso é possível aplicar os resultados do método a fim de otimizar as estruturas encontradas no cotidiano do engenheiro de indústria ou até mesmo para projetistas de estruturas no ramo da construção metal/mecânica.

## REFERÊNCIAS

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

CALLISTER, Jr; WILLIAM, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª Edição. São Paulo: LTC, 2012.

CHAMBERLAIN, Z.; FICANHA, R.; FABEANE, R. **Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço: Edifício Industrial Detalhado**. 9ª Triagem. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

ESTORIA DA HISTÓRIA. Disponível em: <<http://estoriasdahistoria12.blogspot.com/>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DOS PRINCIPAIS SETORES CONSUMIDORES. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/>>. Acesso em: 15 mai. 2019

FERREIRA, L. **Otimização Aplicada à Engenharia: Introdução**. Guarapuava: UTFPR, 2019.

IZMAILOV, A.; SOLODOV, M. **Otimização – volume 1**. 3ª Edição Russa. Rio de Janeiro: IMPA, 2014.

KASSIMALI, A. **Análise Estrutural**. 5ª Edição Norte Americana. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

MINEIRAÇÃO. Disponível em: <<http://envolverde.cartacapital.com.br/>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

NASCIMENTO, B. **Abordagem Didática e Prática da Ação dos Ventos em Estruturas**. São Paulo: Construmetal, 2016.

NETO, J. **Estruturas Metálicas: Vigas de Alma Cheia: Flexão**. Goiânia: PUC, 2016.

PERFIS ESTRUTURAIS GERDAU: TABELA DE BITOLAS. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/perfil-i-gerdau>>. Acesso em 19 jan. 2019.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**. 8ª Edição. Rio de Janeiro, 2009.

O PROCESSO DE BESSEMER E A SIDERURGIA MODERNA. Disponível em: <<https://www.cosiaco.com.br/blog/o-processo-de-bessemer-e-siderurgia-moderna/>>. Acesso em: 29 ago. 2018

O PODER DO EXCEL. Disponível em: <<https://www.blogsenacsp.com.br/>>. Acesso em: 09 Jul. 2019.

PINHEIRO, Antonio C.F.B. **Estruturas Metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos.** 2ª Edição. São Paulo: Blucher, 2005.

SARDÁ, A. **Estruturas Metálicas: Vigas de Alma Cheia.** Curitiba: UFPR, 2018.

## APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UM ESTUDO DE CASO REAL

O estudo de caso foi realizado na mesma indústria de papel onde foi realizado o estágio obrigatório. A proposta foi de redimensionar o sistema de suporte da tubulação de vapor superaquecido da Caldeira II. Entende-se pelo suporte a coluna e viga em perfil I montadas em L como mostrado na Figura 29.

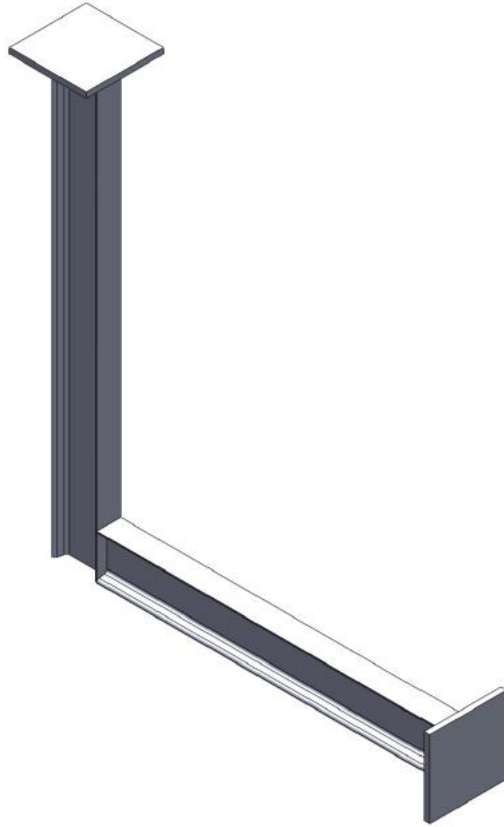
**Figura 31** - Sistema de suporte de tubulação de vapor



**Fonte:** Fornecido pela indústria de papel (2019).

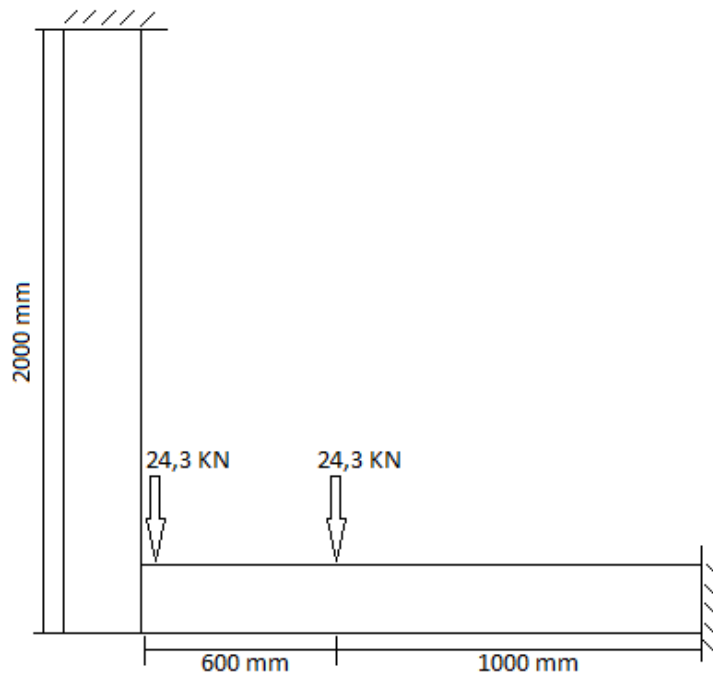
O suporte da tubulação de vapor sustenta uma carga aproximada de 48,6 KN compreendida pelo peso da tubulação com 10 m de comprimento, todo o isolamento térmico e as vigas de suporte que se apoiam na via estudada. A carga será dividida em dois apoios, que se referem às vigas perpendiculares ao sistema estudado. Na Figura 30 está ilustrada uma vista tridimensional do sistema de suporte isolado, realizado em CAD. Por outro lado, na Figura 31, está ilustrado um esboço dos comprimentos da viga e da coluna do sistema a ser redimensionado, bem como sua construção e as cargas solicitadas de projeto.

**Figura 32** - Sistema de suporte (vista isométrica).



**Fonte:** Autoria própria

**Figura 33** - Esboço plano frontal com cargas



**Fonte:** Autoria própria

Os parâmetros de projeto do sistema de suporte da tubulação são compreendidos pelos dados inseridos na planilha onde foi aplicado o método, abaixo estão ilustrados nas Figuras 32 para a viga e na Figura 33 para a coluna. As reações internas de carga axial de tração, cisalhamento e momento fletor foram calculadas para ambos os casos, viga e coluna. Estes foram inseridos na tela de inserção dos parâmetros juntamente com o material utilizado, que para este projeto foi escolhido o aço ASTM A36.

**Figura 34** - Parâmetros de projeto da Viga

**TELA PARA INSERÇÃO DOS PARÂMETROS**

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS		SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO	
Lx (mm)	1600	N(kN)	0,31
Ly (mm)	1600	Vx(kN)	2,38
Lb (mm)	1600	Vy(kN)	0
kx	1	Mx(kN.cm)	121
ky	1	My(kN.cm)	0
kz	1	MATERIAL	
d (mm)	0	ASTM A36	
		Fy (kN/cm <sup>2</sup> )	25

**Fonte:** Autoria própria

**Figura 35** - Parâmetros de projeto da Coluna.

**TELA PARA INSERÇÃO DOS PARÂMETROS**

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS		SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO	
Lx (mm)	2000	N(kN)	26,92
Ly (mm)	2000	Vx(kN)	2,62
Lb (mm)	2000	Vy(kN)	0
kx	1	Mx(kN.cm)	40
ky	1	My(kN.cm)	0
kz	1	MATERIAL	
d (mm)	0	ASTM A36	
		Fy (kN/cm <sup>2</sup> )	25

**Fonte:** Autoria própria

Os resultados obtidos através do método mostram que tanto para a viga quanto para a coluna, o ranqueamento através da função macro são iguais até o décimo perfil do catálogo. Esse comportamento acontece pelo fato do sistema de suporte não demandar uma carga elevada, tendo uma resistência bem maior quando comparado às reações solicitantes de projeto. Comparando as Figuras 34 e 35 é possível perceber essa igualdade.

**Figura 36** - Resultado do método para a Viga.**OTIMIZAÇÃO DOS PERFIS**

Perfil	Peso	%
W 150 x 13,0	13,00	24,02%
W 200 x 15,0	15,00	25,16%
W 250 x 17,9	17,90	26,80%
W 150 x 18,0	18,00	22,99%
W 200 x 19,3	19,30	24,92%
W 310 x 21,0	21,00	28,07%
W 250 x 22,3	22,30	25,89%
W 150 x 22,5 (H)	22,50	14,61%
W 200 x 22,5	22,50	24,02%
W 310 x 23,8	23,80	27,49%

**Fonte:** Autoria própria**Figura 37** - Resultado do método para a Coluna.**OTIMIZAÇÃO DOS PERFIS**

Perfil	Peso	%
W 150 x 13,0	13,00	30,03%
W 200 x 15,0	15,00	31,45%
W 250 x 17,9	17,90	33,50%
W 150 x 18,0	18,00	28,74%
W 200 x 19,3	19,30	31,15%
W 310 x 21,0	21,00	35,09%
W 250 x 22,3	22,30	32,36%
W 150 x 22,5 (H)	22,50	18,26%
W 200 x 22,5	22,50	30,03%
W 310 x 23,8	23,80	34,36%

**Fonte:** Autoria própria

Após o ranqueamento dos perfis que atendem às cargas solicitantes é necessário realizar a escolha daquele que representa o melhor custo x benefício para a empresa. Como o perfil W 150 x 13,0 pode ser encontrado em comércios locais, a melhor escolha pelo método e pela regionalidade é este, traduzido por uma eficiência de 30,03% e um peso de 13 Kg/m linear totalizando em 33,8 Kg o peso total da estrutura metálica, desconsiderando os parafusos, soldas e chapas de topo.