

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Matheus Kerkhoff Guanabara**

**DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS:  
ROTINA COMPUTACIONAL PARA SELEÇÃO DE PERFIS  
METÁLICOS**

Porto Alegre  
dezembro 2010

**MATHEUS KERKHOFF GUANABARA**

**DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS:  
ROTINA COMPUTACIONAL PARA SELEÇÃO DE PERFIS  
METÁLICOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Ruy Carlos Ramos de Menezes**

Porto Alegre  
dezembro 2010

**MATHEUS KERKHOFF GUANABARA**

**DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS:  
ROTINA COMPUTACIONAL PARA SELEÇÃO DE PERFIS  
METÁLICOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2010

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes  
Dr. Techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)**  
Dr. Techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria

**Gustavo Prates Mezzomo**  
Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Marcelo Marcondes de Carvalho**  
Eng. Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação esteve ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes, orientador deste trabalho, pela ajuda, incentivo e dedicação.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt, coordenadora deste trabalho, pelo apoio, críticas e ensinamentos.

Agradeço à minha família, pela atenção e auxílio.

Seja pacífico, seja cortês, obedeça às leis, respeite a todos;  
mas se alguém colocar as mãos em você, mande-o para o  
cemitério.

*Hajj Malik El Shabazz*

## RESUMO

GUANABARA, M. K. **Dimensionamento de estruturas metálicas:** rotina computacional para seleção de perfis metálicos. 2010. 83 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Estruturas metálicas apresentam diversas vantagens em relação às de concreto armado e são largamente utilizadas em países desenvolvidos, principalmente na execução de obras que exigem grande padrão técnico e velocidade na sua execução. A presente pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie os profissionais, que trabalham com projetos desse tipo de estrutura, na escolha do melhor perfil de aço para suas necessidades. Para tanto, a rotina computacional apresenta as características mecânicas do aço, as propriedades geométricas das diferentes seções existentes no mercado, a determinação das solicitações advindas dos carregamentos mais comuns (cargas pontuais e distribuídas) e as equações e suas particularidades para o dimensionamento das estruturas quanto aos esforços de tração, compressão, flexão e corte.

Palavras-chave: NBR 8800:2008; estruturas metálicas; perfis de aço; dimensionamento.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: etapas de pesquisa .....	19
Figura 2: constante de empenamento e momento de inércia à rotação pura .....	24
Figura 3: constante módulo plástico e sua relação com o módulo elástico.....	25
Figura 4: carga uniformemente distribuída em viga bi-apoiada .....	28
Figura 5: carga pontual em viga bi-apoiada .....	28
Figura 6: carga pontual e carga uniformemente distribuída em viga em balanço .....	29
Figura 7: princípio da superposição .....	30
Figura 8: seção líquida de perfis furados .....	33
Figura 9: tela inicial do programa .....	63
Figura 10: tela biblioteca do programa .....	64
Figura 11: tela solicitações do programa .....	65
Figura 12: tela verificação do programa .....	67
Figura 13: determinação do $C_t$ .....	68
Figura 14: determinação do $C_b$ .....	68
Figura 15: determinação da resistência do aço ao escoamento e ruptura .....	69
Figura 16: tela dimensionamento do programa .....	70
Figura 17: exemplo de solicitação à tração .....	72
Figura 18: validação do programa para o esforço de tração .....	74
Figura 19: exemplo de solicitação à compressão .....	75
Figura 20: validação do programa para o esforço de compressão .....	76
Figura 21: exemplo de solicitação à flexão e ao corte .....	77
Figura 22: validação do programa para o esforço de flexão .....	79
Figura 23: validação do programa para o esforço cortante .....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: constantes físicas do aço .....	23
Quadro 2: valores dos coeficientes de ponderação das resistências .....	26
Quadro 3: definição da espessura e largura das partes componentes dos perfis metálicos .....	27
Quadro 4: coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados .....	39
Quadro 5: valores de $(b/t)_{lim}$ .....	41
Quadro 6: parâmetros referentes ao momento fletor resistente .....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_z L_z$  = coeficiente de flambagem por torção

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade

$\gamma_{a2}$  = coeficiente de ponderação relacionado à ruptura

$\sigma_{cr}$  = tensão normal crítica

$M_{Rd}$  = momento fletor resistente de cálculo

$M_{Sd}$  = momento fletor solicitante de cálculo

$N_{c,Rd}$  = força axial de compressão resistente de cálculo

$N_{c,Sd}$  = força axial de compressão solicitante de cálculo

$N_{t,Rd}$  = força axial de tração resistente de cálculo

$N_{t,Sd}$  = força axial de tração solicitante de cálculo

$V_{Rd}$  = força cortante resistente de cálculo

$V_{Sd}$  = força cortante solicitante de cálculo

$f_u$  = resistência à ruptura do aço

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço

$\lambda_0$  = índice de esbeltez reduzido

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento

$a$  = distância entre enrijecedores transversais adjacentes

$A_c$  = área dos segmentos ligados

$A_e$  = área líquida efetiva da seção transversal da barra

$A_{ef}$  = área efetiva da seção transversal

$A_g$  = área bruta da seção transversal

$A_n$  = área líquida da barra

$A_w$  = área efetiva de cisalhamento

$b$  = largura dos elementos comprimidos AL

$b_{ef}$  = largura efetiva dos elementos comprimidos AA

$b_f$  = largura da mesa

$b_{fi}$  = largura da mesa inferior

$b_{fs}$  = largura da mesa superior

$c_a$  = coeficiente igual a 0,38 para mesas e almas de seções tubulares retangulares ou quadradas, e 0,34 para os demais casos

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme

$C_t$  = coeficiente de redução da área líquida

$C_w$  = constante de empenamento da seção transversal

$d$  = altura externa da seção

$d$  = diâmetro da barra

$D$  = diâmetro externo da seção tubular circular

$E$  = módulo de elasticidade do aço

$E$  = módulo de elasticidade do aço

$e_c$  = excentricidade do plano de ligação em relação ao centro geométrico da seção da porção que resiste ao esforço de tração

$G$  = módulo de elasticidade transversal do aço

$h$  = altura da alma

$I$  = momento de inércia de seção transversal em relação a um dos eixos principais de inércia

$I_y$  = momento de inércia em relação ao eixo  $y$

$J$  = constante de torção da seção transversal

$KL$  = comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia

$\ell$  = comprimento efetivo da ligação

$L_b$  = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)

$L_v$  = distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula

$M_A$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda

$M_B$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado na seção central do comprimento destravado

$M_C$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica

$M_{max}$  = valor máximo do momento fletor solicitante de cálculo no comprimento destravado

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação

$M_r$  = momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais (exceto para flambagem local da mesa)

$N_e$  = força axial de flambagem elástica

$Q$  = fator de redução total associado à flambagem local

$Q_a$  = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AA

$Q_s$  = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AL

$r_0$  = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento

$r_x$  = raio de giração em relação ao eixo central x

$r_y$  = raio de giração em relação ao eixo central y

$r_{yc}$  = raio de giração da seção T

$t$  = espessura da parede

$t_d$  = espessura de cálculo da parede da seção transversal, tomada igual a 0,93 vez a espessura nominal para tubos com costura, e igual à espessura nominal para tubos sem costura

$t_f$  = espessura da mesa

$t_{fi}$  = espessura da mesa inferior

$t_{fs}$  = espessura da mesa superior

$t_w$  = espessura da alma

$V_{pl}$  = força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento

$W$  = módulo resistente elástico

$W_c$  = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção

$x_0$  = coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo x em relação ao centro geométrico da seção

$y_0$  = coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo y em relação ao centro geométrico da seção

$Z$  = módulo de resistência plástico

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal

$\chi$  = fator de redução associado à resistência à compressão

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	17
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	17
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	17
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....	17
2.3 PRESSUPOSTO .....	18
2.4 PREMISA .....	18
2.5 DELIMITAÇÕES .....	18
2.6 LIMITAÇÕES .....	18
2.7 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 ESTRUTURAS METÁLICAS</b> .....	22
3.1 PROPRIEDADES DO AÇO .....	23
<b>3.1.1 Propriedades mecânicas</b> .....	23
<b>3.1.2 Propriedades geométricas dos perfis de aço</b> .....	23
3.2 ESTADO LIMITE .....	25
3.3 COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS .....	26
3.4 ESBELTEZ .....	26
3.5 CÁLCULO DAS SOLICITAÇÕES .....	27
3.6 DIMENSIONAMENTO .....	30
<b>3.6.1 Tração</b> .....	31
3.6.1.1 Dimensionamento .....	31
3.6.1.2 Determinação da área líquida efetiva .....	32
3.6.1.3 Coeficiente redutor de área líquida .....	33
<b>3.6.2 Compressão</b> .....	34
3.6.2.1 Dimensionamento .....	35
3.6.2.2 Fator de redução associado à resistência à compressão .....	36
3.6.2.3 Força axial de flambagem elástica .....	36
3.6.2.3.1 Seções com dupla simetria ou simetria em relação a um ponto .....	37
3.6.2.3.2 Seções monossimétricas .....	38
3.6.2.3.3 Valores do coeficiente de flambagem .....	38
3.6.2.4 Fator de redução total associado à flambagem local .....	39
3.6.2.4.1 Elementos AA .....	41

3.6.2.4.2 Elementos AL.....	43
3.6.2.4.3 Elementos de seção tubular circular .....	45
<b>3.6.3 Flexão .....</b>	<b>45</b>
3.6.3.1 Momento fletor resistente de cálculo para seção aberta .....	47
3.6.3.2 Momento fletor resistente de cálculo para seção T fletida em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma.....	54
3.6.3.3 Momento fletor resistente de cálculo para seção sólida circular e retangular.....	56
3.6.3.4 Momento fletor resistente de cálculo para seção tubular circular .....	56
<b>3.6.4 Cisalhamento .....</b>	<b>58</b>
3.6.4.1 Seção tubular circular .....	58
3.6.4.2 Seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma e seções tubulares retangulares e caixão .....	59
<b>4 O PROGRAMA .....</b>	<b>62</b>
4.1 A LINGUAGEM <i>VISUAL BASIC</i> .....	62
4.2 TELA INICIAL .....	62
4.3 BIBLIOTECA .....	63
4.4 SOLICITAÇÕES .....	64
4.5 VERIFICAÇÃO .....	66
<b>4.5.1 Coeficiente <math>C_t</math> .....</b>	<b>68</b>
<b>4.5.2 Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme (<math>C_b</math>) ..</b>	<b>68</b>
<b>4.5.3 Resistência do aço ao escoamento (<math>f_y</math>) e a ruptura (<math>f_u</math>) .....</b>	<b>69</b>
4.6 DIMENSIONAMENTO .....	70
4.7 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA .....	71
<b>4.7.1 Verificação para o esforço de tração .....</b>	<b>71</b>
<b>4.7.2 Verificação para o esforço de compressão .....</b>	<b>74</b>
<b>4.7.3 Verificação para o esforço de flexão e de cisalhamento .....</b>	<b>77</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
REFERÊNCIAS .....	83



## 1 INTRODUÇÃO

Estruturas de aço são largamente usadas em países desenvolvidos por propiciarem construções limpas e rápidas que geram mínima interferência no seu entorno. São muito úteis para obras de infraestrutura, tais como aeroportos, estações de metrô e demais instalações que sejam essenciais para o bom funcionamento das cidades.

Além disso, esse material apresenta algumas vantagens em relação ao concreto, sendo elas: o menor tempo de execução, a maior confiabilidade, limpeza da obra e resistência, que propicia a utilização de peças de menores dimensões e que se estendam por maiores vãos. Uma desvantagem das peças metálicas é a impossibilidade de ser moldada em obra e sua variedade de geometrias é limitada aos perfis disponibilizados pelos fabricantes.

Sendo os perfis metálicos elementos fabricados pela indústria com dimensões padronizadas, seu dimensionamento baseia-se na escolha do melhor elemento existente, não na elaboração da geometria ideal para cada caso. Dessa forma, o desafio do profissional que trabalha com projetos de estruturas de aço é a escolha do perfil que mais se adequa às suas necessidades.

Este trabalho de conclusão de curso versará sobre o desenvolvimento de uma rotina para o dimensionamento de estruturas metálicas de aço e sua aplicação no desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie na escolha do perfil mais adequado a ser utilizado. O dimensionamento propriamente dito seguirá rigorosamente as recomendações da NBR 8800:2008, Norma que rege o projeto de estruturas de aço no Brasil.

A linguagem computacional escolhida para o desenvolvimento do programa é a Visual Basic, linguagem essa desenvolvida pela empresa Microsoft. Essa estrutura facilita a utilização dos usuários finais, uma vez que é de uso bastante intuitivo pela presença abundante de botões e caixas de texto.

O capítulo 2 desse trabalho apresenta seus objetivos, restrições e limitações. Ao final do mesmo, é descrito como o trabalho foi desenvolvido, apresentando e descrevendo cada uma de suas etapas.

No capítulo seguinte tem-se um breve histórico da utilização das estruturas metálicas, a apresentação das características do aço e o método de cálculo para o dimensionamento das estruturas metálicas. Também são apresentadas as informações necessárias para o correto dimensionamento e determinação das cargas atuantes na estrutura.

No quarto capítulo é apresentada a ferramenta computacional que foi desenvolvida durante o trabalho, suas peculiaridades e maneira de operação. Também são validados os resultados encontrados por ela.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

O objetivo desse capítulo é a apresentação da questão que será trabalhada, bem como as restrições e limitações desse projeto de pesquisa. Também apresentam-se as etapas do desenvolvimento da pesquisa juntamente com seus detalhamentos.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual seria a rotina computacional adequada para o dimensionamento de estruturas de aço capaz de facilitar o processo de escolha de um perfil metálico, minimizando tanto o tempo empregado no processo, quanto a possibilidade de erros?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração de uma ferramenta computacional capaz de dimensionar estruturas metálicas que facilite a escolha do melhor perfil de aço, baseado em suas propriedades mecânicas, dentre os existentes no mercado, fornecendo ao engenheiro uma lista dos mais adequados.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é o desenvolvimento de uma rotina de cálculo para dimensionar perfis de aço.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que a norma NBR 8800/2008 apresenta forma correta de dimensionamento de estruturas de aço.

## 2.4 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que as estruturas de aço apresentam grande vantagem quando comparadas com similares de concreto armado, apresentando elementos mais leves, de menores dimensões e de maior confiabilidade para as mesmas solicitações.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de dimensionar a estrutura e escolher perfis metálicos de aço submetidos às solicitações de tração, corte, compressão ou flexão, apontando os mais indicados para uso de acordo com os disponíveis no mercado.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) uso da linguagem de programação mais familiar para o autor;
- b) análise de solicitações somente de estruturas isostáticas;
- c) dimensionamento apenas para estado limite último;
- f) perfis de aço de seção constante.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado durante um período de nove meses, de março a novembro de 2010, e teve suas etapas organizadas na figura 1 e apresentadas e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;

- b) detalhamento do tipo de problema que será solucionado;
- c) desenvolvimento da rotina de cálculo;
- d) desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie o dimensionamento;
- e) teste e validação do programa gerado;
- f) considerações finais.

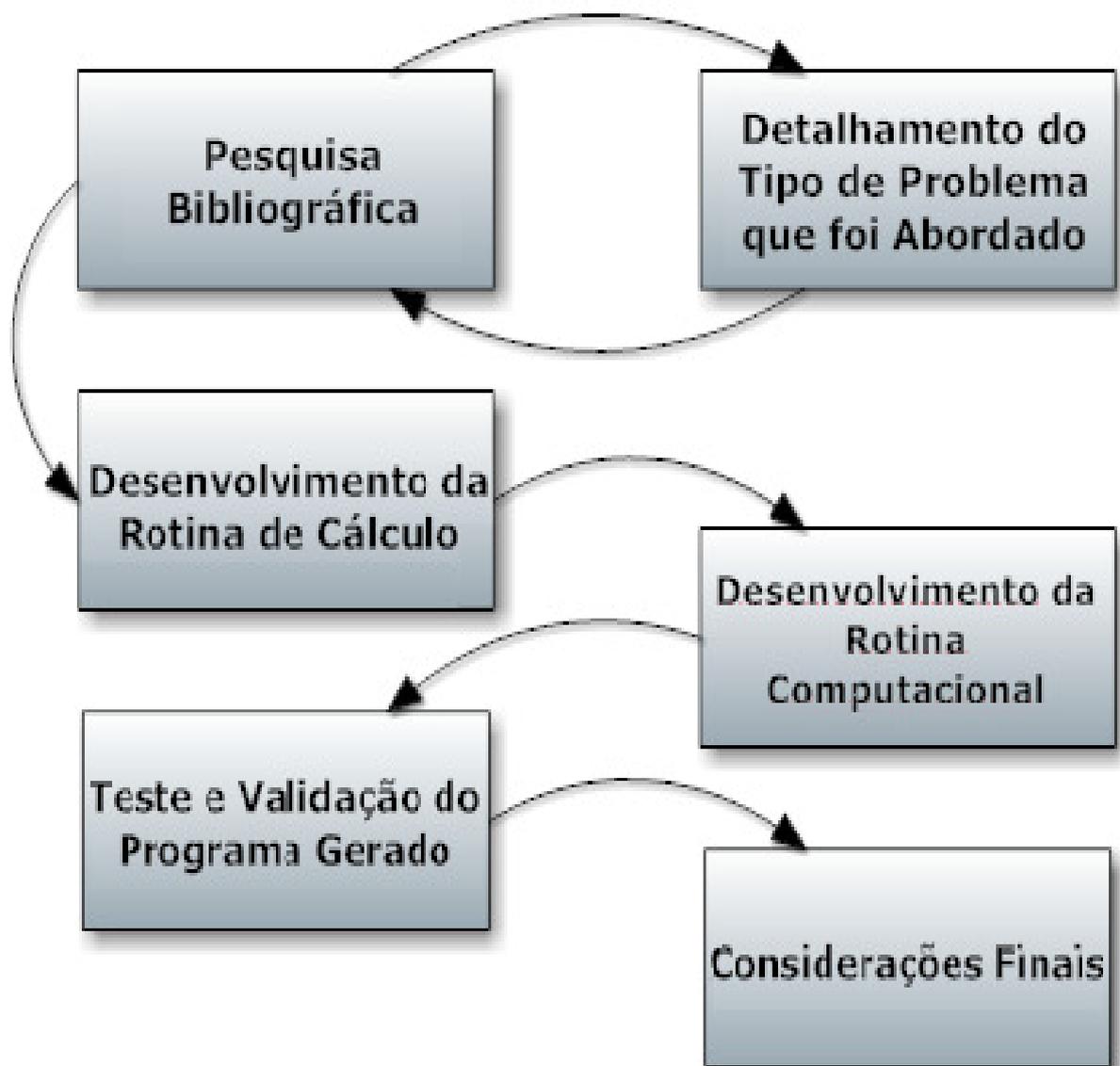


Figura 1: etapas de pesquisa

Inicialmente, realizou-se a pesquisa bibliográfica, que teve por objetivo aprofundar os conhecimentos em estruturas metálicas buscando em diversas fontes informações a respeito do tema, desde sua necessidade real até sua aplicação. É importante salientar que essa etapa ocorreu durante todo o período de pesquisa, principalmente nos meses iniciais, com seu desenvolvimento nos meses finais apenas para complementar os conhecimentos adquiridos.

Com base na pesquisa bibliográfica inicial, foi identificada a necessidade de uma ferramenta computacional que auxilie o profissional que trabalha com projeto de estruturas metálicas a escolher o melhor perfil de aço de acordo com suas necessidades, de maneira ágil e confiável. Partindo desse ponto, retornou-se a fase de pesquisa para identificar quais eram os principais esforços aos quais as estruturas metálicas estão sujeitas, como ocorre a fabricação e a montagem dos perfis, para determinar quais seriam suas condições de contorno, quais os tipos de carregamento mais comuns e qual a melhor forma de apresentar esses dados.

Na terceira etapa, os conhecimentos adquiridos com a pesquisa bibliográfica foram empregados no desenvolvimento de uma rotina de cálculo para o dimensionamento dos perfis metálicos, levando em conta as condições de estabilidade da estrutura e os casos particulares decorrentes da geometria de cada perfil. Tendo sido o objetivo dessa etapa encontrar a maneira mais rápida de cálculo e que produzisse resultados corretos.

A informação gerada na etapa anterior foi usada na quarta etapa, adaptando-a para que pudesse ser transformada em rotinas computacionais que foram utilizadas no desenvolvimento de uma ferramenta capaz de dimensionar os perfis metálicos de maneira rápida e confiável. Para tanto, o *software* Visual Basic foi usado, o que conferiu ao programa desenvolvido facilidade de operação pelo profissional e grande capacidade de armazenar informações, tais como as propriedades dos perfis industrializados.

Concluído o programa, a próxima etapa foi o teste do mesmo, e a validação dos resultados encontrados, confrontando-os com exemplos de livros. No caso de divergência de resultados ou falhas do programa, a quinta etapa foi refeita a fim de apurar os erros e gerar uma ferramenta computacional confiável e capaz de auxiliar uma profissional a escolher o melhor perfil possível.

Finalmente, foram feitas as considerações finais, analisando os resultados gerados por esse trabalho e verificando se os objetivos foram atendidos. Também foi feita uma avaliação da ferramenta computacional gerada, apontando qualidades e defeitos.

### 3 ESTRUTURAS METÁLICAS

Pfeil e Pfeil (2009, p. 2) explicam que o primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido, entre 1780 e 1820, sendo utilizado na construção de pontes em arco e treliçadas nos elementos sujeitos à compressão. Os elementos que resistiam aos esforços de tração eram feitos de ferro forjado que, além da excelente resistência à tração, apresentava boa resistência à corrosão.

O aço, apesar de ser conhecido desde a Antiguidade, não era muito utilizado até meados do século XIX devido a seu preço pouco competitivo. Fato esse que mudou com a invenção de Henry Bessemer: um forno que permitia a produção de aço em larga escala, dessa forma tornando o preço do produto mais competitivo (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 2).

De acordo com Bellei (2006, p. 1-2) as principais vantagens das estruturas metálicas são:

- 1- Alta resistência do material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão etc.), o que permite aos elementos estruturais suportarem grandes esforços apesar da área relativamente pequena das suas seções; por isso, as estruturas de aço, apesar da sua grande densidade ( $7.850 \text{ kg/m}^3$ ), são mais leves do que elementos produzidos em concreto armado.
- 2- Os elementos de aço oferecem uma grande margem de segurança no trabalho, o que se deve ao fato de o material ser único e homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos.
- 3- Os elementos de aço são fabricados em oficinas, de preferência seriados, e sua montagem é bem mecanizada, permitindo com isso diminuir o prazo final de construção.
- 4- Os elementos de aço podem ser desmontados e substituídos com facilidade, o que permite reforçar ou substituir facilmente diversos elementos da estrutura.
- 5- Possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção.

Este capítulo tem por objetivo a apresentação das equações e informações necessárias para o dimensionamento de estruturas metálicas. Está dividido de forma a primeiro expor as características dessas estruturas e, posteriormente, a forma de cálculo das solicitações e o seu dimensionamento.

### 3.1 PROPRIEDADES DO AÇO

Essa seção é dividida, para facilitar o entendimento, entre as propriedades mecânicas do aço e as geométricas dos perfis. As propriedades geométricas serão apresentadas em figuras pois dessa forma a compreensão é mais fácil.

#### 3.1.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do aço variam bastante devido aos diferentes materiais incorporados a sua liga. Por exemplo, para níveis de carbono mais altos, tanto a resistência do aço quanto sua fragilidade aumentam e sua resistência à tração diminui (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 1). Por isso a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 13) define como propriedades do aço para uso em estruturas as do quadro 1.

Constante Física	Valor
Módulo de elasticidade, E	200.000 MPa
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,3
Coefficiente de dilatação térmica, $\beta$	$12 \times 10^{-6} C^{-1}$
Massa específica, $\rho$	7.850 $kg/m^3$
Módulo de elasticidade transversal do aço, G	77.000 MPa

Quadro 1: constantes físicas do aço (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 307)

#### 3.1.2 Propriedades geométricas dos perfis metálicos

As fórmulas para determinação das propriedades geométricas de um corpo tais como constante de empenamento,  $C_w$ , momento de inércia à torção pura, J, módulo plástico, Z, e elástico, W, etc. dependem somente da sua geometria, seja ela qual for. Dessa forma, pode-se calcular essas propriedades para cada tipo de perfil em termos gerais, uma vez que sua produção é padronizada e sua seção conhecida, o que facilita em muito o processo de dimensionamento das peças metálicas, deixando-o mais ágil. As propriedades geométricas estão apresentadas nas figuras 2 e 3.

$O$  — Centro de torção.  
 $G$  — Centro de gravidade.  
 $J$  — Momento de inércia à torção pura.  
 $C_\omega$  — Constantes de empenamento =  $\int_A \omega^2 dA$ .

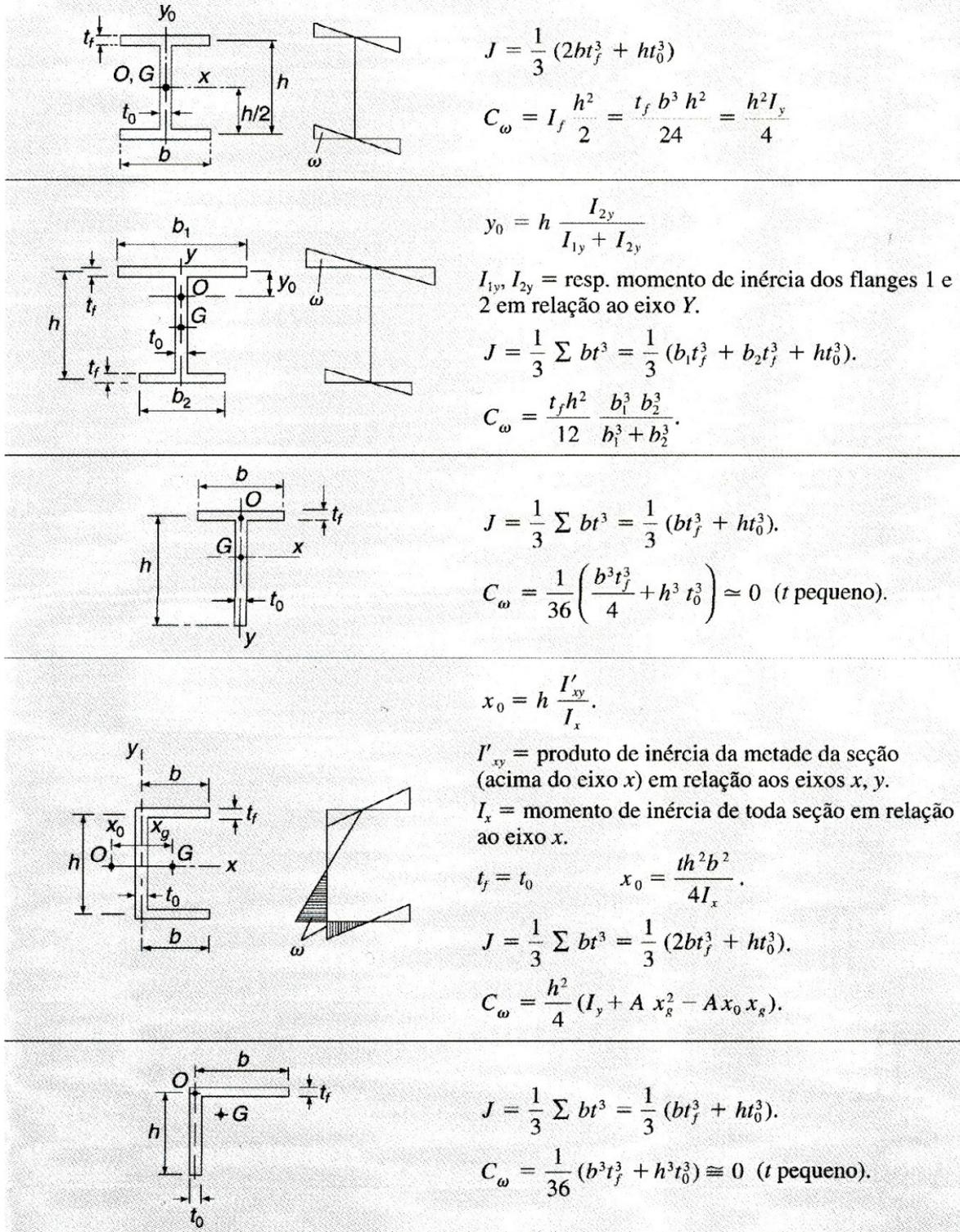


Figura 2: constante de empenamento e momento de inércia à rotação pura (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 349)

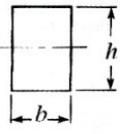
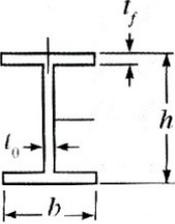
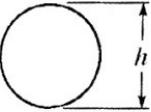
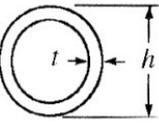
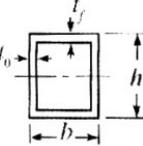
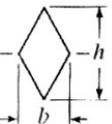
Seção	Módulo Plástico Z	Z/W
	$\frac{bh^2}{4}$	1,5
	(x - x) $bt_f(h - t_f) + \frac{t_0}{4} (h - 2t_f)^2$	1,12 (aprox.)
	(y - y) $\frac{b^2 t_f}{2} + \frac{1}{4} (h - 2t_f)t_0^2$	1,55 (aprox.)
	$\frac{h^3}{6}$	1,70
	$\frac{h^3}{6} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2t}{h} \right)^3 \right]$	$\frac{16}{3\pi} \left[ \frac{1 - \left( 1 - \frac{2t}{h} \right)^3}{1 - \left( 1 - \frac{2t}{h} \right)^4} \right]$
	$th^2 (t \ll h)$	
	$\frac{bh^2}{4} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2t_0}{b} \right) \left( 1 - \frac{2t_f}{h} \right)^2 \right]$	1,12 (aprox.)
	$\frac{bh^2}{12}$	2

Figura 3: constante módulo plástico e sua relação com o módulo elástico  
(PFEIL: PFEIL, 2009, p. 351)

### 3.2 ESTADO LIMITE

Segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 35-36), o estado limite ocorre quando a estrutura não satisfaz mais um de seus objetivos, seja manter a sua estabilidade, seja gerar conforto e segurança para seus usuários. Podendo ser dividido em duas categorias, ou seja, estado limite:

- a) de serviço;
- b) último.

O estado limite de serviço ou de utilização, como também é conhecido, está associado a cargas em serviço e é atingido sempre que a estrutura apresentar vibrações ou deformações excessivas que gerem desconforto aos seus usuários (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 35). Este trabalho não irá se ater a esse estado limite, uma vez que não gera riscos à estabilidade estrutural.

O estado limite último está associado à ocorrência de cargas excessivas e consequente colapso da estrutura, e pode ser visto como uma condição que deve ser atendida, no qual os esforços solicitantes,  $S$ , devem ser menores que os resistentes,  $R$ . A diferença entre esses dois esforços é denominada margem de segurança.

### 3.3 COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS

O coeficiente de ponderação da resistência é uma constante utilizada para obtenção do valor da resistência de cálculo, e é constituído de parcelas referentes a variabilidade da resistência dos materiais utilizados, a diferença entre a resistência obtida no corpo-de-prova e na estrutura, e a falhas na construção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 22-23). Os valores desse coeficiente são apresentados no quadro 2 conforme a classificação da combinação última de ações.

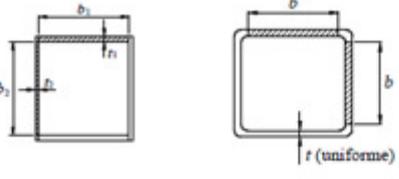
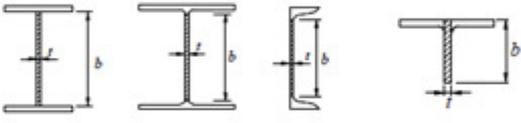
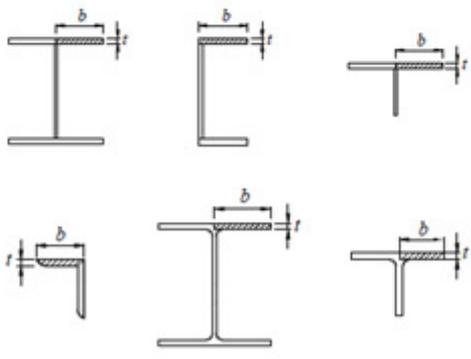
Combinações	Aço estrutural <sup>a</sup>	
	$\gamma_a$	
	Escoamento, flambagem e instabilidade $\gamma_{a1}$	Ruptura $\gamma_{a2}$
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Quadro 2: valores dos coeficientes de ponderação das resistências (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 23).

### 3.4 ESBELTEZ

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 36) define esbeltez como sendo a relação entre largura e espessura ( $b/t$ ) da seção transversal do perfil. O

quadro 3 apresenta a parte das seções dos perfis metálicas que devem ser consideradas como largura e como espessura para o cálculo da esbeltez.

Elemento	Largura, $b$ , e espessura, $t$
Seção fechada	
Alma	
Mesa	

Quadro 3: definição da espessura e largura das partes componentes dos perfis metálicos (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008)

### 3.5 CÁLCULO DAS SOLICITAÇÕES

A Aço Minas Gerais S/A (1989, p. 47) afirma “[que] É uma necessidade de qualquer edifício ou estrutura que ela não enfraqueça ou se torne insegura durante o seu tempo de vida útil programado, devido à ação de qualquer forma ou combinação de forças que por ventura possam surgir.”. Para tanto, é importante determinar como as cargas aplicadas agem e quais as solicitações que são geradas por elas. Esses efeitos são apresentados nas figuras 4 a 6.

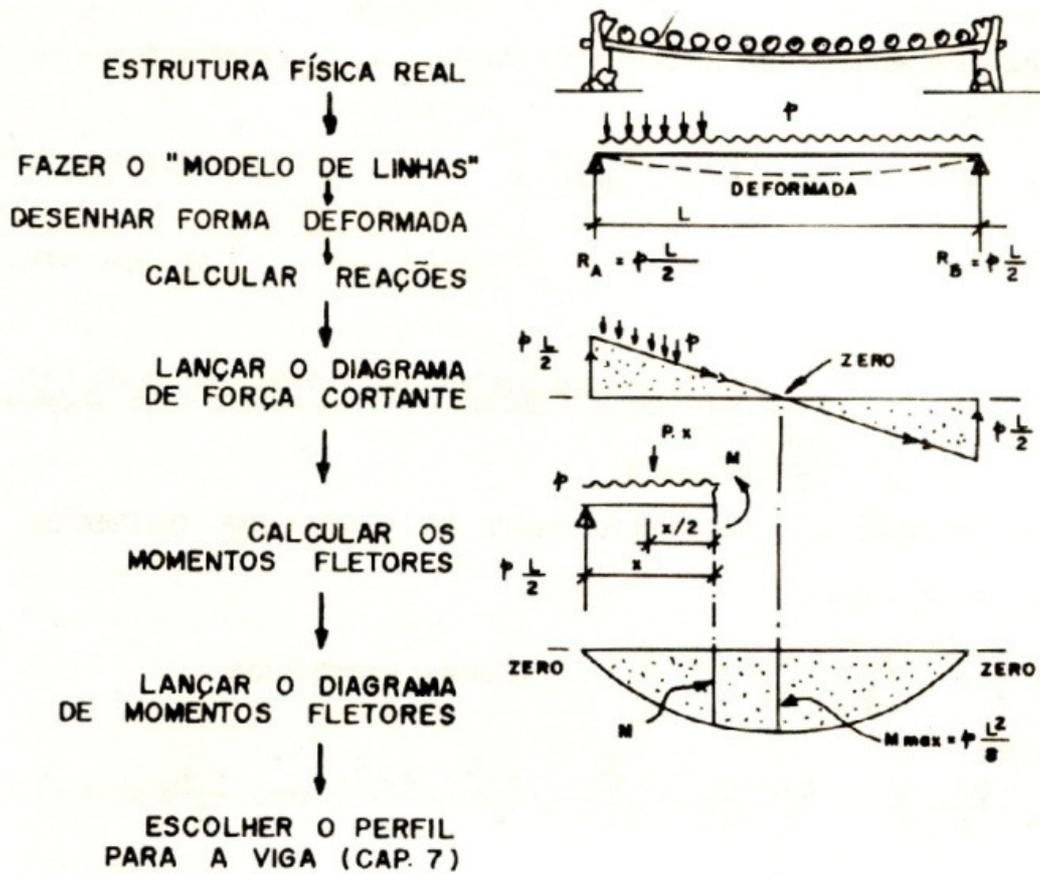


Figura 4: carga uniformemente distribuída em viga bi-apoiada (AÇO MINAS GERAIS S/A, 1989, p. 47)

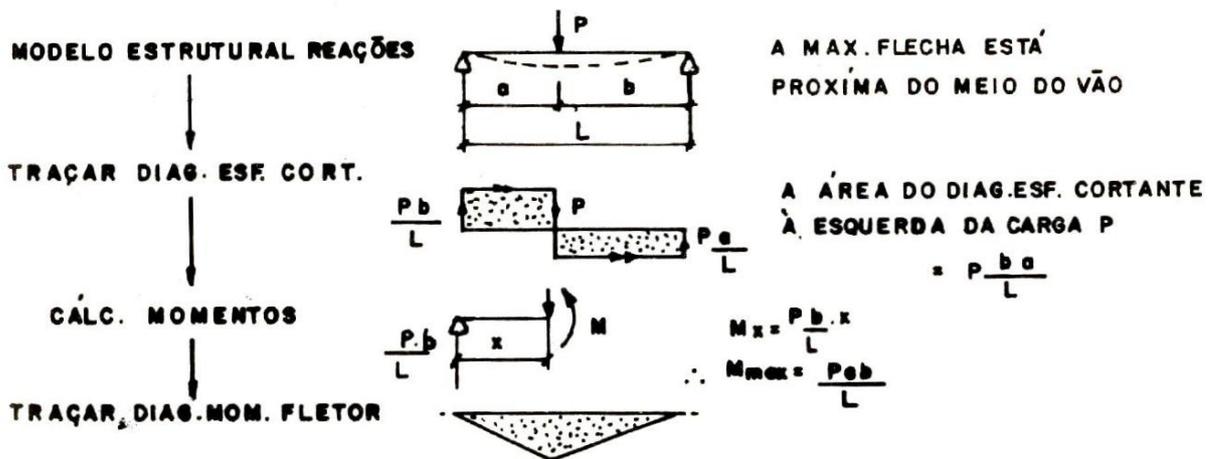


Figura 5: carga pontual em viga bi-apoiada (AÇO MINAS GERAIS S/A, 1989, p. 47)

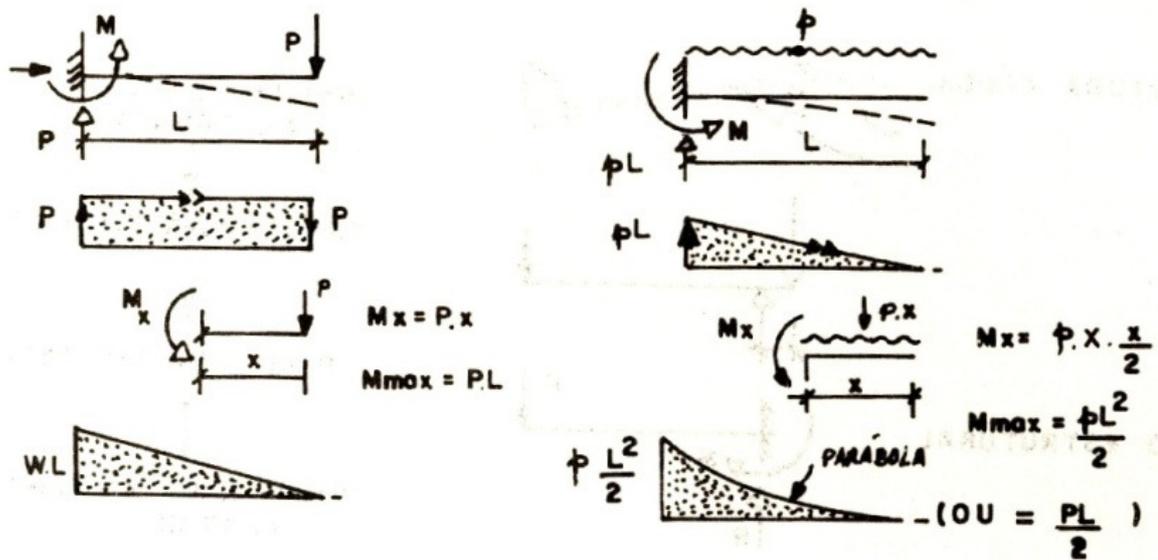


Figura 6: carga pontual e carga uniformemente distribuída em viga em balanço  
(AÇO MINAS GERAIS S/A, 1989, p. 47)

No caso de mais de um tipo de carregamento atuar ao mesmo tempo pode-se usar o princípio da superposição, que, segundo Gere e Weaver (1981, p. 19), “[...] é um dos conceitos mais importante na análise estrutural. Pode ser usado sempre que existam relações lineares entre as ações e os deslocamentos [...]”. Ainda afirmam que “De acordo com o princípio da superposição, as ações e os deslocamentos causados por A1 e A2 atuando separadamente [figura 7] podem ser combinados para obter as ações e deslocamentos causados por A1 e A2 atuando simultaneamente [...]”. Afirmção está ilustrada na figura 7 e tem como consequência as equações 1 a 4:

$$R_A = R'_A + R''_A \quad (\text{equação 1})$$

$$R_B = R'_B + R''_B \quad (\text{equação 2})$$

$$M_B = M'_B + M''_B \quad (\text{equação 3})$$

$$D = D' + D'' \quad (\text{equação 4})$$

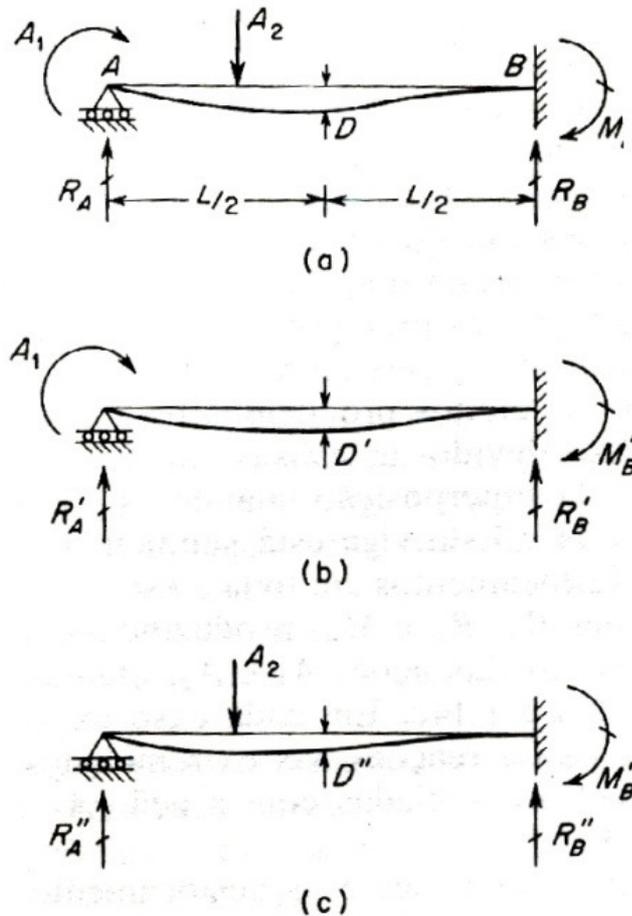


Figura 7: princípio da superposição (GERE: WEAVER, 1981, p. 20)

### 3.6 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de perfis metálicos parte da premissa de que os esforços resistentes devem sempre ser superiores aos solicitantes para garantir a estabilidade da estrutura. As solicitações são dados conhecidos nos problemas de dimensionamento sendo que a parcela a ser determinada é a força resistente, que varia de acordo com o tipo de solicitação e com o tipo de seção estudada.

Este item versa sobre o dimensionamento das peças metálicas, sendo subdividido para cada um dos esforços analisados (tração, compressão, flexão e corte). O dimensionamento é feito de acordo com o que é proposto pela NBR 8800:2008.

### 3.6.1 Tração

Pfeil e Pfeil (2009, p. 47) explicam que peças tracionadas são aquelas sujeitas a solicitações de tração axial ou tração simples. Sendo empregadas nas estruturas sob diversas formas:

- a) tirantes ou pendurais;
- b) contraventamentos de torres (estais);
- c) travejamento de vigas ou colunas;
- d) barras tracionadas de treliças.

#### 3.6.1.1 Dimensionamento

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 37), para o dimensionamento de barras tracionadas deve ser respeitada a condição expressa pela equação 5:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$N_{t,Sd}$  = força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$  = força axial de tração resistente de cálculo.

A força axial de tração resistente de cálculo deve ser o menor dos valores obtidos nas equações 6 e 7, sendo a primeira para o escoamento da seção bruta e a segunda para a ruptura da seção líquida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 37):

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{equação 6})$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$A_g$  = área bruta da seção transversal da barra;

$A_e$  = área líquida efetiva da seção transversal da barra;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$f_u$  = resistência à ruptura do aço;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

$\gamma_{a2}$  = coeficiente de ponderação relacionado à ruptura.

### 3.6.1.2 Determinação da área líquida efetiva

A área líquida efetiva para barras prismáticas é dada por (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 38):

$$A_e = C_t A_n \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$A_n$  = área líquida da barra;

$C_t$  = coeficiente de redução da área líquida.

Pfeil e Pfeil (2009, p. 51) definem como área líquida das barras ( $A_n$ ) “[a área] obtida subtraindo-se da área bruta ( $A_g$ ) as áreas dos furos contidos em uma seção reta da peça.”.

Também indicam que “No caso de furação enviesada, é necessário pesquisar diversos percursos para encontrar o menor dos valores de seção líquida, uma vez que a peça pode romper segundo qualquer um desses percursos.”. Esse conceito é representado na figura 8, com as linhas tracejadas representando os possíveis percursos de ruptura da peça a serem considerados.

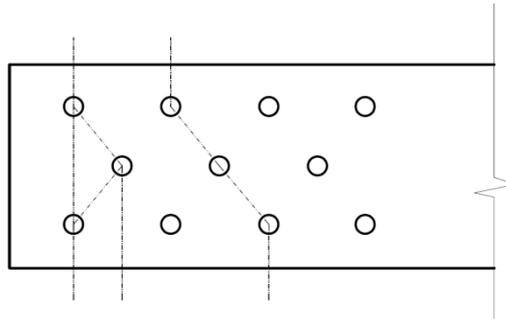


Figura 8: seção líquida de perfis furados

No caso de barras com extremidades rosqueadas, a área líquida efetiva é dada segundo a equação 9 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 76):

$$A_e = 0,75A_b \quad (\text{equação 9})$$

Sendo

$$A_b = 0,25\pi d^2 \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$d$  = diâmetro da barra.

### 3.6.1.3 Coeficiente redutor de área líquida

O coeficiente de redução de área líquida depende do tipo de perfil e do comprimento de ligação dos elementos soldados ou parafusados. Pfeil e Pfeil (2009, p. 52) indicam que “Quanto maior o comprimento da ligação, menor é a redução aplicada às áreas.”.

Segundo a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 39), o valor desse coeficiente é de 1,00, quando a força de tração for transmitida diretamente para todos os elementos por soldas ou parafusos, ou é dado pela equação 11, para ligações compostas apenas por soldas, ou pela equação 12, para perfis de seção aberta:

$$C_t = \frac{A_c}{A_g} \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$A_c$  = área dos segmentos ligados;

$A_g$  = área bruta da seção transversal da barra.

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{\ell} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$e_c$  = excentricidade do plano de ligação em relação ao centro geométrico da seção da porção que resiste ao esforço de tração;

$\ell$  = comprimento efetivo da ligação (é igual ao comprimento da solda na direção da força de tração, para ligações soldadas, ou a distância entre o primeiro e o último parafuso na direção da força de tração, para ligações parafusadas).

### 3.6.2 COMPRESSÃO

Esta subseção apresenta os critérios de dimensionamento de barras prismáticas submetidas à compressão simples, levando em conta os efeitos de flambagem. Sendo que os efeitos da flexocompressão não serão abordados.

Pfeil e Pfeil (2009, p. 119, grifo do autor) mostram as principais diferenças entre os esforços de compressão e os de tração:

Ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito. Os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por **flambagem por flexão** que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça em relação ao caso da peça tracionada [...].

### 3.6.2.1 Dimensionamento

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 43), no dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão, deve ser atendida a condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

$N_{c,Sd}$  = força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  = força axial de compressão resistente de cálculo.

A força axial resistente de cálculo é dada pela equação 14. É importante ressaltar que os efeitos associados aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local já estão considerados nessa equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

$\chi$  = fator de redução associado à resistência à compressão;

$Q$  = fator de redução total associado à flambagem local;

$A_g$  = área bruta da seção transversal da barra;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço.

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade.

### 3.6.2.2 Fator de redução associado à resistência à compressão

O fator de redução associado à resistência à compressão varia de acordo com o índice de esbeltez reduzido,  $\lambda_0$ , que é apresentado na equação 15. Para valores de  $\lambda_0$  inferiores ou iguais à 1,5,  $\chi$  é dado pela equação 16. Para os demais valores do índice de esbeltez reduzido, determina-se o fator de redução associado à resistência à compressão conforme indicado na equação 17 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 44):

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (\text{equação 15})$$

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (\text{equação 16})$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (\text{equação 17})$$

Onde:

$N_e$  = força axial de flambagem elástica;

$\lambda_0$  = índice de esbeltez reduzido.

### 3.6.2.3 Força axial de flambagem elástica

A força axial de flambagem elástica representa a carga de compressão máxima em que ainda é possível manter a configuração retilínea da estrutura, sem que ocorra o efeito de flambagem (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 120). Essa força é definida para cada tipo de perfil nos próximos itens.

### 3.6.2.3.1 Seções com dupla simetria ou simetria em relação a um ponto

São exemplos de perfis com dupla simetria ou simetria em relação a um ponto os perfis I, H, barras redondas, entre outros. Nesse caso precisa-se calcular o  $N_e$  para flambagem em relação aos eixos principais de inércia e para flambagem por torção. Os valores de  $N_e$  são apresentados nas equações 18 e 19, respectivamente, e deve ser escolhido o menor dos valores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 121):

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (\text{equação 18})$$

$$N_e = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

$KL$  = comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia;

$I$  = momento de inércia de seção transversal em relação a um dos eixos principais de inércia;

$K_z L_z$  = coeficiente de flambagem por torção;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$C_w$  = constante de empenamento da seção transversal;

$G$  = módulo de elasticidade transversal do aço;

$J$  = constante de torção da seção transversal;

$r_0$  = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado por:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

$r_x$  = raio de giração em relação ao eixo central  $x$ ;

$r_y$  = raio de giração em relação ao eixo central  $y$ ;

$x_0$  = coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo  $x$  em relação ao centro geométrico da seção;

$y_0$  = coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo  $y$  em relação ao centro geométrico da seção.

### 3.6.2.3.2 Seções monossimétricas

Seções T e U são exemplos de seções monossimétricas. Nesses perfis, a força axial de flambagem elástica para flexão é determinada da mesma maneira que para seções com dupla simetria, mas para a flexo-torção deve ser calculada conforme a equação 21. Cabe ressaltar que foi considerado o eixo  $y$  como o de simetria, caso o eixo de simetria seja o  $x$ , basta substituir  $y$  por  $x$  (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 122):

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2[1 - (y_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ez}[1 - (y_0/r_0)^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{equação 21})$$

Onde:

$N_{ey}$  = força axial de flambagem elástica para flambagem por flexão em relação ao eixo  $y$ ;

$N_{ez}$  = força axial de flambagem elástica para flambagem por torção em relação ao eixo  $z$ ;

### 3.6.2.3.3 Valores do coeficiente de flambagem

Os coeficientes de flambagem por flexão são definidos segundo representações no quadro 4. Caso o elemento analisado seja contraventado, esse coeficiente deve ser tomado igual a 1,0, a menos que seja possível adotar um valor inferior (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 125).

O coeficiente de flambagem por torção a ser utilizado é 1,0 quando ambas as extremidades possuírem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre. No caso de



flambagem local,  $Q$ , será igual a 1,00. Caso a relação  $(b/t)$  for superior à  $(b/t)_{lim}$ ,  $Q$  será determinado segundo a equação 22 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 126):

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad (\text{equação 22})$$

Onde:

$Q_s$  = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AL (quadro 5);

$Q_a$  = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AA (quadro 5).

No caso da seção possuir apenas elementos AL, o termo  $Q_a$  é suprimido. O inverso acontece para seção que apresenta somente elementos AA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 126).

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de $b$ e $t$	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas ou almas de seções tubulares retangulares</li> <li>Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas</li> </ul>		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Almas de seções I, H ou U</li> <li>Mesas ou almas de seção-caixão</li> <li>Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1</li> </ul>		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas de seções I, H, T ou U laminadas</li> <li>Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> <li>Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> </ul>		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	Mesas de seções I, H, T ou U soldadas <sup>a</sup>		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Quadro 5: valores de  $(b/t)_{lim}$   
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 128)

### 3.6.2.4.1 Elementos AA

Para elementos do tipo AA cuja relação entre largura e espessura ultrapassar os valores indicados no quadro 5 é necessário calcular o  $Q_a$ . A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 129) indica a equação 23 como forma de obter o valor do fator de redução total associado à flambagem local:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

$$A_{ef} = A_g - (b - b_{ef})t \quad (\text{equação 24})$$

e

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[ 1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \quad (\text{equação 25})$$

Onde:

$A_g$  = área bruta;

$A_{ef}$  = área efetiva da seção transversal;

$b$  = largura dos elementos comprimidos AA;

$t$  = espessura dos elementos comprimidos AA;

$b_{ef}$  = largura efetiva dos elementos comprimidos AA;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$c_a$  = coeficiente igual a 0,38 para mesas e almas de seções tubulares retangulares ou quadradas, e 0,34 para os demais casos.

### 3.6.2.4.2 Elementos AL

O cálculo de  $Q_s$  somente é necessário quando a relação entre largura e espessura ultrapassar os valores indicados no quadro 5. A norma NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 126-127) determina os valores desse fator conforme o grupo ao qual o elemento AL pertence.

Determina-se o  $Q_s$  para elementos AL pertencentes ao grupo 3 (quadro 5) utilizando as equações 26 e 27:

$$Q_s = 1,34 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 26})$$

$$Q_s = \frac{0,53E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 27})$$

Se o elemento pertencer ao grupo 4 (quadro 5), usa-se as equações 28 e 29:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 28})$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 29})$$

Pertencendo ao grupo 5 (quadro 5), utiliza-se as equações 30 a 32:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}} \quad (\text{equação 30})$$

$$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}} \quad (\text{equação 31})$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \quad (\text{equação 32})$$

E para elementos do grupo 6 (quadro 5), usa-se as equações 33 e 34:

$$Q_s = 1,908 - 1,22 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 33})$$

$$Q_s = \frac{0,69 E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 34})$$

Onde:

$k_c$  = coeficiente que varia entre 0,35 e 0,76;

$h$  = altura da alma;

$t_w$  = espessura da alma;

$b$  = largura dos elementos comprimidos AL;

$t$  = espessura dos elementos comprimidos AL;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço.

### 3.6.2.4.3 Elementos de seção tubular circular

Nos elementos de seção tubular circular, o fator de redução para flambagem local,  $Q$ , é determinado na NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 129) pelas equações 35 e 36. Não sendo prevista a utilização de seções com  $D/t$  superior a  $0,45E/f_y$ :

$$Q = 1,00, \text{ para } \frac{D}{t} \leq \frac{E}{f_y} \quad (\text{equação 35})$$

$$Q = \frac{0,038E}{f_y(D/t)} + \frac{2}{3}, \text{ para } 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (\text{equação 36})$$

Onde:

$D$  = diâmetro externo da seção tubular circular;

$t$  = espessura da parede.

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço.

## 3.6.3 FLEXÃO

Pfeil e Pfeil (2009, p. 153, grifo do autor) demonstram a importância do dimensionamento à flexão:

No projeto no estado limite último de vigas sujeitas à flexão simples calcula-se, para as seções críticas, o momento e o esforço cortante resistentes de projeto para compará-los aos respectivos esforços solicitantes de projeto [...].

A resistência à flexão das vigas pode ser afetada pela flambagem local e pela flambagem lateral. A **flambagem local** é a perda de estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil, a qual reduz o momento resistente da seção.

Na **flambagem lateral** a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão (em geral vertical) e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção [...].

Os tipos de seções transversais mais adequados para o trabalho à flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, isto é, com as áreas mais afastadas do eixo neutro. O ideal, portanto, é concentrar as áreas em duas chapas, uma superior e uma inferior, ligando-as por uma chapa fina. Concluímos assim que as vigas em forma de I são as mais funcionais [...].

Do trecho anterior nota-se que a determinação do momento resistente de cálculo dependerá dos efeitos de flambagem local e de flambagem lateral, e chega-se à mesma conclusão apontada pela NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47) e apresentada na equação 37:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (\text{equação 37})$$

Onde:

$M_{Sd}$  = momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{Rd}$  = momento fletor resistente de cálculo.

O momento fletor resistente de cálculo deve ser determinado para o caso de flambagem lateral com torção (FLT), de flambagem local da mesa (FLM) e de flambagem local da alma (FLA), sendo seu valor o menor encontrado nesses casos. Além disso, o momento fletor resistente de cálculo depende da esbeltez do perfil, devendo ser calculado diferentemente em função de seu valor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47).

Nos itens seguintes, serão apresentadas as equações para a determinação do momento fletor resistente de cálculo. Cabe ressaltar que os valores das variáveis  $\lambda_p$ ,  $\lambda_r$ , e  $M_{cr}$  serão indicados posteriormente no quadro 6.

### 3.6.3.1 Momento fletor resistente de cálculo para seção aberta

O momento fletor resistente de cálculo para seções do tipo I, H, U, C, etc., com exceção do perfil T, é determinado de acordo com as equações que seguem (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 130):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{equação 38})$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{equação 39})$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{equação 40})$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (\text{equação 41})$$

$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3,0 \quad (\text{equação 42})$$

Sendo que a equação 40 não pode ser usada para flambagem local da alma e:

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme, adotado como 1,0 no para flambagem local da mesa e da alma;

$M_r$  = momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais (exceto para flambagem local da mesa);

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação definido na quadro 6;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento definido na quadro 6;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$Z$  = módulo de resistência plástico;

$M_{\max}$  = valor máximo do momento fletor solicitante de cálculo no comprimento destravado;

$M_A$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda;

$M_B$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado na seção central do comprimento destravado;

$M_C$  = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda.

O quadro 6 define os valores do momento fletor de plastificação, do momento fletor correspondente ao início do escoamento, da esbeltez da seção e dos parâmetros de esbeltez correspondentes à plastificação e ao início do escoamento. Sendo as notas referentes ao quadro e usadas no dimensionamento apresentadas em seguida.

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pl}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pl}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Quadro 6: parâmetros referentes ao momento fletor resistente  
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 134)

A nota 1, apresentada no quadro 6, indica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 135):

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{equação 43})$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)} \quad (\text{equação 44})$$

$$\beta_1 = \frac{0,7W}{EJ} \quad (\text{equação 45})$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (\text{equação 46})$$

Onde:

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$I_y$  = momento de inércia em relação ao eixo y;

$J$  = constante de torção da seção transversal;

$C_w$  = constante de empenamento da seção transversal;

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica;

$r_y$  = raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$L_b$  = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme;

$d$  = altura externa da seção;

$t_f$  = espessura da mesa.

No caso de uso da nota 2 do quadro 6 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 135):

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_{yc} J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{equação 47})$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{L_b^2} \left[ \beta_3 \sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \right] \quad (\text{equação 48})$$

$$\beta_1 = \frac{0,7W}{EJ} \quad (\text{equação 49})$$

$$\beta_3 = 0,45 \left( d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) \left( \frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right) \quad (\text{equação 50})$$

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}}, \text{ sendo que } 1/9 \leq \alpha_y \leq 9 \quad (\text{equação 51})$$

$$\beta_2 = 5,2\beta_1\beta_3 + 1 \quad (\text{equação 52})$$

$$C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2}\right)^2}{12} \left( \frac{t_{fi} b_{fi}^3 t_{fs} b_{fs}^3}{t_{fi} b_{fi}^3 + t_{fs} b_{fs}^3} \right) \quad (\text{equação 53})$$

Onde:

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$I_y$  = momento de inércia em relação ao eixo y;

J = constante de torção da seção transversal;

$r_{yc}$  = raio de giração da seção T;

$C_w$  = constante de empenamento da seção transversal;

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica;

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme;

E = módulo de elasticidade do aço;

$L_b$  = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

$t_{fi}$  = espessura da mesa inferior;

$t_{fs}$  = espessura da mesa superior;

$b_{fi}$  = largura da mesa inferior;

$b_{fs}$  = largura da mesa superior.

Em relação a nota 6 do quadro 6 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 136), se perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c, \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}} \quad (\text{equação 54})$$

Se perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,9Ek_c}{\lambda^2} W_c, \lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y/k_c}}, \quad (\text{equação 55})$$

Onde:

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica;

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$W_c$  = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$k_c$  = coeficiente que varia entre 0,35 e 0,76 (definido na equação 32).

Para a nota 10 (quadro 6) tem-se (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 136):

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \text{ para seções caixão} \quad (\text{equação 56})$$

$$\lambda_p = 2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \text{ para seções tubulares retangulares} \quad (\text{equação 57})$$

Onde:

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço.

### 3.6.3.2 Momento fletor resistente de cálculo para seção T fletida em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma

O momento fletor resistente de cálculo para seção T fletida em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma é dado pelas equações que seguem, sendo as equações 58 e 59 referentes à flambagem lateral com torção:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{\pi \sqrt{EI_y GJ}}{L_b} \left( B + \sqrt{1 + B^2} \right) \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{equação 58})$$

$$B = \pm 2,3 \frac{d}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}} \quad (\text{equação 59})$$

Sendo que B tem valor positivo quando a extremidade oposta à mesa estiver completamente tracionada, e negativo caso contrário.

As equações 60 a 62 são referentes à flambagem local da mesa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 133):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{equação 60})$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( 1,19 - 0,5\lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) f_y W_c, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{equação 61})$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,69EW_c}{\lambda^2}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{equação 62})$$

com:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (\text{equação 63})$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 64})$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 65})$$

Onde:

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação;

$G$  = módulo de elasticidade transversal do aço;

$J$  = constante de torção da seção transversal;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

$I_y$  = momento de inércia em relação ao eixo  $y$ ;

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$d$  = altura externa da seção;

$L_b$  = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

$W_c$  = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção;

$b_f$  = largura da mesa;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$t_f$  = espessura da mesa.

### 3.6.3.3 Momento fletor resistente de cálculo para seção sólida circular e retangular

Para seção sólida circular ou retangular o momento fletor resistente de cálculo é dado por (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 132):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{equação 66})$$

### 3.6.3.4 Momento fletor resistente de cálculo para seção tubular circular

No caso de seções tubulares circulares, pode-se determinar o momento fletor de cálculo pelas equações que seguem, sendo que para seções com relação  $D/t$  superior a  $0,45 E/f_y$ , esse método não pode ser empregado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 133):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{equação 67})$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( \frac{0,021E}{D/t} + f_y \right) W, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{equação 68})$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,33E}{D/t} W, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{equação 69})$$

com:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (\text{equação 70})$$

$$\lambda_p = 0,07 \frac{E}{f_y} \quad (\text{equação 71})$$

$$\lambda_r = 0,31 \frac{E}{f_y} \quad (\text{equação 72})$$

Onde:

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$W$  = módulo resistente elástico;

$D$  = diâmetro externo da seção tubular circular;

$t$  = espessura da parede.

### 3.6.4 CISALHAMENTO

A Aço Minas Gerais S/A (1989, p. 71) afirma que “O cisalhamento ocorre quando há um desligamento das porções adjacentes do material de uma barra [...] [e] é resistido essencialmente pela área vertical da seção transversal da viga [...]”. Para o dimensionamento desse esforço, utilizando a NBR 8800, deve ser atendida a equação 73 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47):

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (\text{equação 73})$$

Onde:

$V_{Sd}$  = força cortante solicitante de cálculo;

$V_{Rd}$  = força cortante resistente de cálculo.

O cálculo da força cortante resistente de cálculo segundo a NBR 8800 difere entre perfis de seção tubular circular e os demais. Dessa forma, as próximas seções apresentam as equações envolvidas no dimensionamento de cada um desses casos, respectivamente.

#### 3.6.4.1 Seção tubular circular

A determinação da força cortante de cálculo para seção tubular circular é dada por (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 52):

$$V_{Rd} = \frac{0,5\sigma_{cr}A_g}{\gamma_{a1}} \quad (\text{equação 74})$$

com  $\sigma_{cr}$  o maior dos seguintes valores:

$$\sigma_{cr} = \frac{1,6E}{\sqrt{\frac{L_v}{D}} \left(\frac{D}{t_d}\right)^{5/4}} \leq 0,6f_y \quad (\text{equação 75})$$

$$\sigma_{cr} = \frac{0,78E}{\left(\frac{D}{t_d}\right)^{3/2}} \leq 0,6f_y \quad (\text{equação 76})$$

Onde:

$\sigma_{cr}$  = tensão normal crítica;

$A_g$  = área bruta da seção transversal;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$L_v$  = distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula;

$D$  = diâmetro externo;

$t_d$  = espessura de cálculo da parede da seção transversal, tomada igual a 0,93 vez a espessura nominal para tubos com costura, e igual à espessura nominal para tubos sem costura.

#### 3.6.4.2 Seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma e seções tubulares retangulares e caixão

A determinação da força cortante de cálculo para seção qualquer, exceto a tubular circular, é dada por (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 50-51):

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{equação 77})$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{equação 78})$$

$$V_{Rd} = 1,24 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{equação 79})$$

com:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{equação 80})$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (\text{equação 81})$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (\text{equação 82})$$

Onde:

$V_{pl}$  = força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço;

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez da seção transversal;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$h$  = altura da alma;

$t_w$  = espessura da alma;

$k_v$  = uma variável igual a 5,0 para almas sem enrijecedores transversais, para  $\frac{a}{h} > 3$  ou para

$\frac{a}{h} > \left[ \frac{260}{h/t_w} \right]^2$ , e  $5 + \frac{5}{(a/h)^2}$  para os demais casos;

$a$  = distância entre enrijecedores transversais adjacentes.

Sendo:

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y \quad (\text{equação 83})$$

Onde:

$A_w$  = área efetiva de cisalhamento, definida para seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma na equação 84 e para seções tubulares retangulares e caixão na equação 85.

$$A_w = dt_w \quad (\text{equação 84})$$

$$A_w = 2ht_w \quad (\text{equação 85})$$

Onde:

$d$  = altura total da seção transversal;

$h$  = altura da alma;

$t_w$  = espessura da alma.

## 4 O PROGRAMA

O presente capítulo tem por objetivo descrever a ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, mostrando suas funções, explicando como ela deve ser operada e apresentando alguns resultados gerados por ela, bem como uma breve descrição da linguagem *Visual Basic*. Subdividiu-se o capítulo conforme a descrição da linguagem computacional usada, as funções do programa e exemplos calculados utilizando ele.

### 4.1 A LINGUAGEM *VISUAL BASIC*

A linguagem de programação *Visual Basic* é um aperfeiçoamento da linguagem *Basic*, ambas desenvolvidas pela empresa *Microsoft* e é utilizada por grande parte das empresas que atuam no mercado de programação. Suas principais características são a programação voltada para eventos, um ambiente integrado de programação totalmente gráfico, o que facilita em muito o desenvolvimento de *softwares*, e a possibilidade de utilização de banco de dados, que tornam viável o trabalho com grandes quantidades de informação.

### 4.2 TELA INICIAL

A tela inicial do programa, figura 9, apresenta o nome do programa, versão, autoria, motivação para o seu desenvolvimento, nomes do autor e orientador do trabalho de diplomação, um menu e botões com o mesmo título dos itens do menu. As funções do menu, bem como dos botões que apresentam o mesmo texto, são as seguintes:

- a) biblioteca: carrega a biblioteca de perfis e seções tubulares;
- b) solicitações: carrega a tela de cálculo das solicitações;
- c) verificação: carrega as telas para verificações da resistência de perfis escolhidos pelo o usuário;
- d) dimensionamento: carrega as telas para a determinação do perfil ideal;
- e) atualizar: atualiza automaticamente a biblioteca com informações sobre novos perfis.

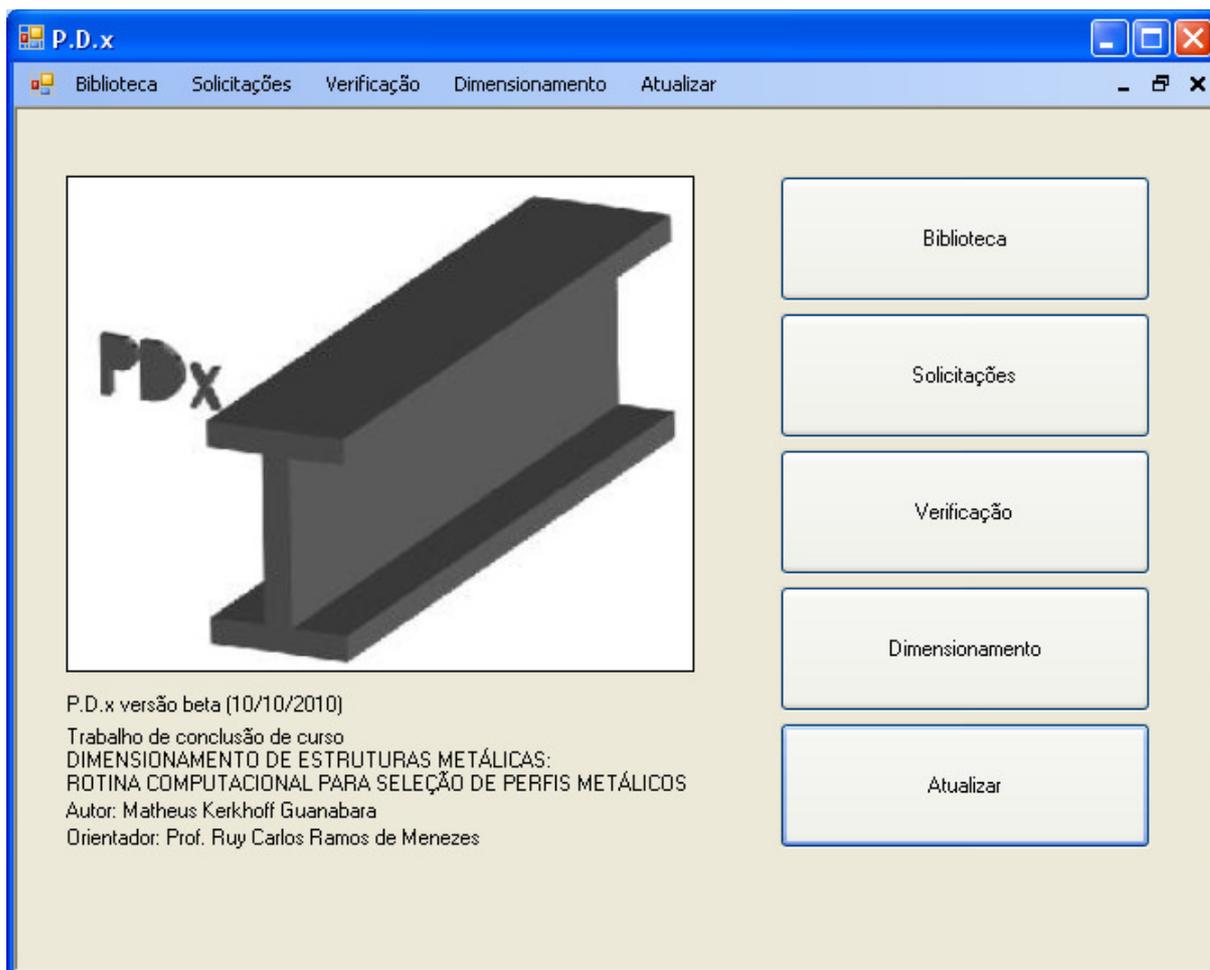


Figura 9: tela inicial do programa

### 4.3 BIBLIOTECA

A biblioteca, exposta na figura 10, é o ambiente do programa no qual são expostos os perfis e seções tubulares cadastrados com suas características. Essa função atua em conjunto com a <Atualizar> que, a partir de arquivos de texto desenvolvidos especialmente para esse fim, atualiza os perfis e seções tubulares cadastrados, a fim de manter sempre um banco de dados dos elementos atualmente produzidos e comercializados.

Para facilitar a visualização das informações dos diferentes tipos de perfil e seções tubulares, cada um deles é exposto em guias diferentes e, dentro de cada uma delas, encontra-se uma tabela contendo o nome do perfil, sua massa linear e as demais características geométricas relevantes para o seu dimensionamento e escolha para projeto. Nessa tela, o usuário é impossibilitado de alterar as informações, a fim de evitar erros de cálculo e incoerências. A única maneira de alterar as informações contidas na biblioteca é através da rotina <Atualizar>.

The screenshot shows a software window titled "P.D.x - [Biblioteca]". The menu bar includes "Biblioteca", "Solicitações", "Verificação", "Dimensionamento", and "Atualizar". Below the menu bar, there are tabs for "Perfil I", "Perfil C", "Perfil L", "Perfil T", "Seção Tubular Circular", and "Seção Tubular Quadrada". The main area contains a table with the following data:

Nome	Massa [kg/m]	d [mm <sup>2</sup> ]	b <sub>f</sub> [mm <sup>2</sup> ]	t <sub>w</sub> [mm <sup>2</sup> ]	t <sub>f</sub> [mm <sup>2</sup> ]
W 150 x 13.0	13	148	100	4.3	4.9
W 150 x 18.0	18	153	102	5.8	7.1
W 150 x 22.5 (H)	22.5	152	152	5.8	6.6
W 150 x 24.0	24	160	102	6.6	10.3
W 150 x 29.8 (H)	29.8	157	153	6.6	9.3
W 150 x 37.1 (H)	37.1	162	154	8.1	11.6
W 200 x 15.0	15	200	100	4.3	5.2
W 200 x 19.3	19.3	203	102	5.8	6.5
W 200 x 22.5	22.5	206	102	6.2	8
W 200 x 26.6	26.6	207	133	5.8	8.4
W 200 x 31.3	31.3	210	134	6.4	10.2
W 200 x 35.9 (H)	35.9	201	165	6.2	10.2
W 200 x 41.7 (H)	41.7	205	166	7.2	11.8
W 200 x 46.1 (H)	46.1	203	203	7.2	11
W 200 x 52.0 (H)	52	206	204	7.9	12.6
HP 200 x 53.0 (H)	53	204	207	11.3	11.3
W 200 x 59.0 (H)	59	210	205	9.1	14.2
W 200 x 71.0 (H)	71	216	206	10.2	17.4
W 200 x 86.0 (H)	86	222	209	13	20.6

Figura 10: tela biblioteca do programa

Os arquivos de texto utilizados para armazenar as informações dos perfis tem seus dados retirados das tabelas dos principais fabricantes, dessa forma, a rotina computacional sempre escolherá um perfil existente e disponível no mercado. Caso algum deles tenha sua produção interrompida ou outras geometrias sejam introduzidas, basta alterar o arquivo no qual os dados estão salvos e ativar a rotina <Atualizar>.

#### 4.4 SOLICITAÇÕES

Esta é a parte da ferramenta computacional que calcula as solicitações as quais as peças metálicas estarão sujeitas com base nos seus carregamentos. A tela desta função é apresentada na figura 11.

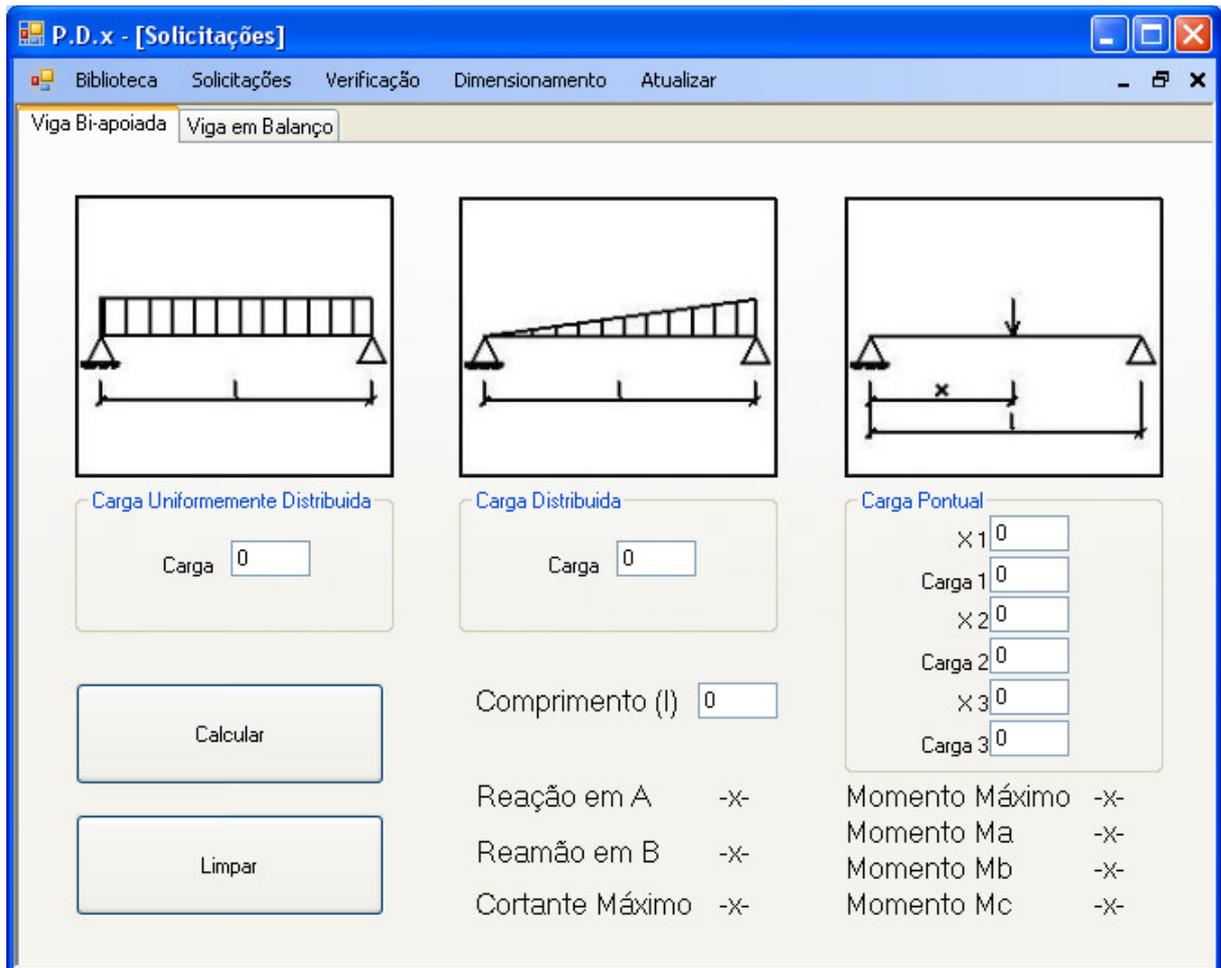


Figura 11: tela solicitações do programa

Essa tela também é dividida em abas, viga bi-apoiada e viga em balanço, de mesmo conteúdo e forma, sendo a única diferença entre elas que a primeira calcula as solicitações para vigas bi-apoiadas e a segunda para vigas em balanço. Nota-se que não são determinadas as unidades em nenhum dos campos, isso pelo resultado ser expresso conforme as unidades escolhidas pelo usuário. Sugere-se que sejam usadas as unidades do sistema internacional, contudo, podem ser utilizadas quaisquer, contanto que seja adotado um padrão e este seja coerente em todos os campos.

Encontra-se na função <Solicitações> três imagens referentes a um carregamento uniformemente distribuído, a um distribuído triangularmente e a um pontual, respectivamente e, sob cada uma das imagens, uma caixa de texto no qual o usuário deve digitar o valor da carga. Para o carregamento pontual ainda tem-se o **campo X**, que também é preenchido pelo o usuário e representa a distância entre o ponto de aplicação da carga e a extremidade esquerda

da viga. É importante dizer que se pode ter até três cargas pontuais, referentes aos índices 1, 2 e 3, e não é necessário que todos os campos **carga** sejam preenchidos. Mas o **comprimento** deve ser indicado.

Uma vez que todos os carregamentos tenham sido definidos, o botão <Calcular> deve ser pressionado, fazendo assim com que as reações nos apoios, momentos e cortante máximo da seção sejam apresentados. Caso seja do interesse do usuário apagar todas as informações digitadas, basta clicar no botão <Limpar> que o valor de todos os campos retornará a zero.

A ferramenta computacional utiliza o princípio da superposição dos efeitos, conceito apresentado no item 3.5 deste trabalho, para determinar as solicitações, calculando separadamente as solicitações para cada carregamento e somando seus efeitos. Tal rotina é efetuada para cada décimo de milésimo do comprimento da viga, sendo cada resultado encontrado comparado e escolhido o maior para a determinação do momento fletor e cortante máximos.

#### 4.5 VERIFICAÇÃO

Bem como o restante do programa, essa seção também é dividida em diversas guias, uma para cada tipo de perfil, visto que a determinação da força resistente apresenta peculiaridades dependendo da geometria da peça. A funcionalidade dessa seção do programa é verificar a resistência para uma determinada geometria de um perfil e é apresentada na figura 12.

A tela apresenta seis campos principais que devem ser preenchidos pelo usuário, o **comprimento**, o **nome** (apresentado em forma de lista baseada na biblioteca do programa), o **coeficiente  $C_t$** , o **fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme ( $C_b$ )** e as **resistência do aço ao escoamento ( $f_y$ )** e a **ruptura ( $f_u$ )**. Ainda existe a possibilidade de preencher manualmente as características geométricas, no caso do usuário desejar verificar a resistência de alguma peça não cadastrada no banco de dados e a existência de contenção lateral em relação ao eixo y ou ao eixo x ao longo da peça.

Figura 12: tela verificação do programa

Uma vez preenchidos todos os campos, basta clicar em um dos botões, <Tração>, <Compressão>, <Flexão> ou <Corte> que o esforço resistente máximo escolhido será determinado segundo as equações apresentadas ao longo deste trabalho. No caso de algum dos campos ser alterado após a determinação de algum dos esforços máximos, todos os resultados obtidos retornam a -x-, para que não haja confusão quanto a verdadeira resistência do perfil.

Ainda é oferecido auxílio ao usuário para determinação do valor dos campos sublinhados e com cor de texto azul, bastando ele clicar sobre algum deles para que uma tela de ajuda apareça. A determinação de cada um dos valores será apresentada nos itens 4.5.1 a 4.5.3 e se baseia nas equações presentes neste trabalho. Também devem ser definidas as condições de contorno da peça para que o comprimento de flambagem possa ser calculado.

### 4.5.1 Coeficiente $C_t$

Ao clicar sobre o **texto  $C_t$** , a tela **Determinação do  $C_t$** , apresentada na figura 13, será aberta. Nela devem ser informadas as áreas bruta e líquida e a excentricidade do plano de ligação em relação ao centro geométrico da seção, bem como o tipo de ligação, e então pressionado o botão <Determinar  $C_t$ >. O valor desse coeficiente será indicado sob o botão, no local onde se vê o valor 1.

Figura 13: determinação do  $C_t$

### 4.5.2 Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme ( $C_b$ )

Similar à determinação do coeficiente  $C_t$ , deve-se clicar sobre o **texto  $C_b$**  para que a janela **Determinação do  $C_b$**  seja aberta e se possa calcular esse fator. É necessário informar os valores do momento fletor máximo e dos momentos a um meio, um quarto e três quartos do apoio esquerdo para então clicar no botão <Determinar  $C_b$ >. A janela é apresentada na figura a 14.

Figura 14: determinação do  $C_b$

### 4.5.3 Resistência do aço ao escoamento ( $f_y$ ) e a ruptura ( $f_u$ )

A janela de determinação da resistência do aço ao escoamento ( $f_y$ ) e a ruptura ( $f_u$ ) pode ser acessada clicando-se sobre os **textos  $f_y$  e  $f_u$** , e consiste em uma tela com duas abas, uma para as recomendações brasileiras e outra para as da ASTM, cada uma contendo uma tabela retirada da Norma NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 108-109) que indica os valores de ambas as resistências conforme o tipo de aço utilizado na fabricação do perfil. A figura 15 apresenta essa janela.

Tabela A.1 — Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural *								
ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa
MR 250	250	400-560	CG-26	255	410	CF-26	260/260	400/410
AR 350	350	450	CG-28	275	440	CF-28	280/280	440/440
AR 350 COR	350	485				CF-30	---/300	---/490
AR 415	415	520						
ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5008		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes a corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	CGR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450	CGR 500 e		
G-42	415	520	Q-40	380	480	CGR 500A	370	490
G-45	450	550	Q-42	410	520			
			Q-45	450	550			
ABNT NBR 5920/ABNT NBR 5921			ABNT NBR 8261					
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais					
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	Seção circular		Seções quadrada e retangular		
				$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	
CFR 400	---/250	---/380	B	290	400	317	400	
CFR 500	310/370	450/490	C	317	427	345	427	

\* Para limitações de espessura, ver norma correspondente.

Figura 15: determinação da resistência do aço ao escoamento e a ruptura

## 4.6 DIMENSIONAMENTO

Essa é a função principal da ferramenta computacional, é com ela que se determina o perfil ideal baseado no comprimento e solicitações que atuam na peça. Essa escolha é baseada na capacidade resistente do perfil e no seu peso total, sendo indicado como ideal o mais leve dos que apresentam esforço resistente superior ao esforço solicitante. A tela referente à escolha do melhor perfil é apresentada na figura 16.

TIPO	NOME	PESO
-*-	-*-	-*-
-*-	-*-	-*-
-*-	-*-	-*-
-*-	-*-	-*-
-*-	-*-	-*-

Figura 16: tela dimensionamento do programa

Nessa janela o usuário determina quais os tipos de seção deverão ser analisados para que o perfil ideal seja indicado, com base nas informações contidas nos campos **Dados de Projeto**, **Vinculações** e **Dimensionar ao esforço de:**. Cabe ressaltar que nessa tela o sistema de unidades é importante e devem ser respeitado, conforme o que é indicado.

Clicando-se nos **textos Ct, Cb, fy e fu** são abertas as mesmas telas caso o mesmo acontecesse na janela **Verificação** e descritas nos itens 4.5.1 a 4.5.3. O tratamento para o campo **Vinculação** também é análogo ao dado na tela **Verificação**.

Assim que todas as informações forem preenchidas, basta clicar no botão <Determinar o melhor perfil> que o melhor perfil será determinado e apresentado na tabela contida nessa janela, sendo o primeiro o perfil ideal e os quatro seguintes o segundo, terceiro e quarto mais indicados, respectivamente. Caso o usuário deseje salvar as informações geradas, basta preencher um nome no **campo Salvar** e clicar no botão <Salvar> que um arquivo de texto será gerado com as informações referente ao dimensionamento.

O dimensionamento é feito com uma rotina que verifica a resistência de todas as geometrias cadastradas para os perfis indicados pelo usuário no **campo Tipo de Seção** e seleciona somente as que apresentam valores superiores aos indicados nos **Dados de Projeto**. Então, todos os perfis que foram selecionados são ordenados segundo seu peso total e a tabela contida na janela da figura 16 é preenchida.

## 4.7 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Para validar os resultados calculados pela ferramenta computacional, estes serão confrontados com os encontrados em exemplos de livros resolvidos pelos autores dos mesmos. Inicia-se apresentando a verificação para o esforço de tração.

### 4.7.1 Verificação para o esforço de tração

O problema apresentado é do livro de Pfeil e Pfeil (2009, p. 55-56) e seu enunciado é: “Duas chapas 22 x 300 mm são emendadas por meio de talas com 2 x 8 parafusos  $\emptyset$  22 mm (7/8”). Verificar se as dimensões da chapa são satisfatórias, admitindo-se aço MR250 (ASTM A36).”. A figura 17 apresenta como o problema foi ilustrado pelos autores.

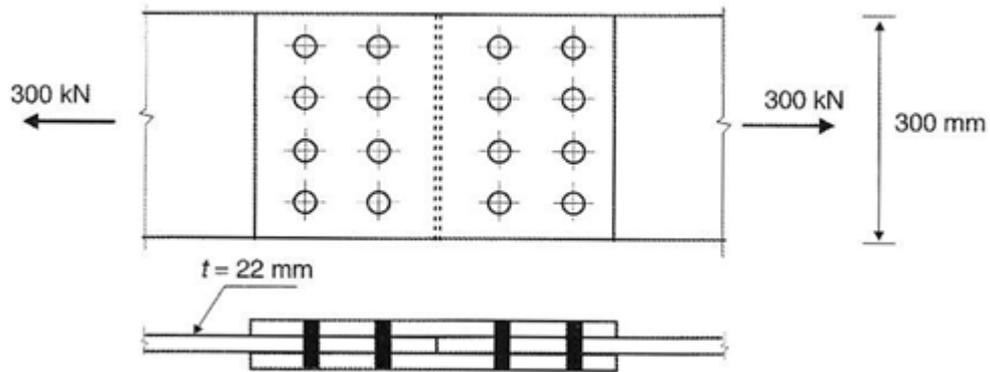


Figura 17: exemplo de solicitação à tração (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 55)

A solução apresentada foi (Pfeil; Pfeil, 2009, p. 55-56):

Área bruta:

$$A_g = 30 \times 2,22 = 66,6 \text{ cm}^2 \quad (\text{equação 86})$$

Área líquida na seção furada é obtida deduzindo-se quatro furos com diâmetro  $22 + 3,5 = 25,5$  mm.

$$A_n = (30 - 4 \times 2,55) \times 2,22 = 44,04 \text{ cm}^2 \quad (\text{equação 87})$$

Admitindo-se que a solicitação seja produzida por uma carga variável de utilização, e o esforço solicitante de cálculo vale:

$$N_{t,sd} = 450 \text{ kN} \quad (\text{equação 88})$$

Os esforços resistentes são obtidos com as equações 89 e 90.

Área bruta:

$$N_{t,Rd} = 66,6 \times \frac{25}{1,10} = 1513 \text{ kN} \quad (\text{equação 89})$$

Área líquida:

$$N_{t,Rd} = 44,0 \times \frac{40}{1,35} = 1304 \text{ kN} \quad (\text{equação 90})$$

Nota-se que no exemplo do livro calcula-se a resistência à tração para uma chapa de aço, que foi simulada no programa igualando-se a espessura e o comprimento da mesa de um perfil tipo I a zero. Além disso, as diferenças entre os resultados obtidos com a ferramenta computacional e os apresentados nos exemplos são atribuídas à diferença na precisão do cálculo, uma vez que nos exemplos são usadas apenas duas casas decimais e o programa utiliza uma quantidade muito maior. A tela com o resultado obtido pela ferramenta computacional está exposta na figura 18.

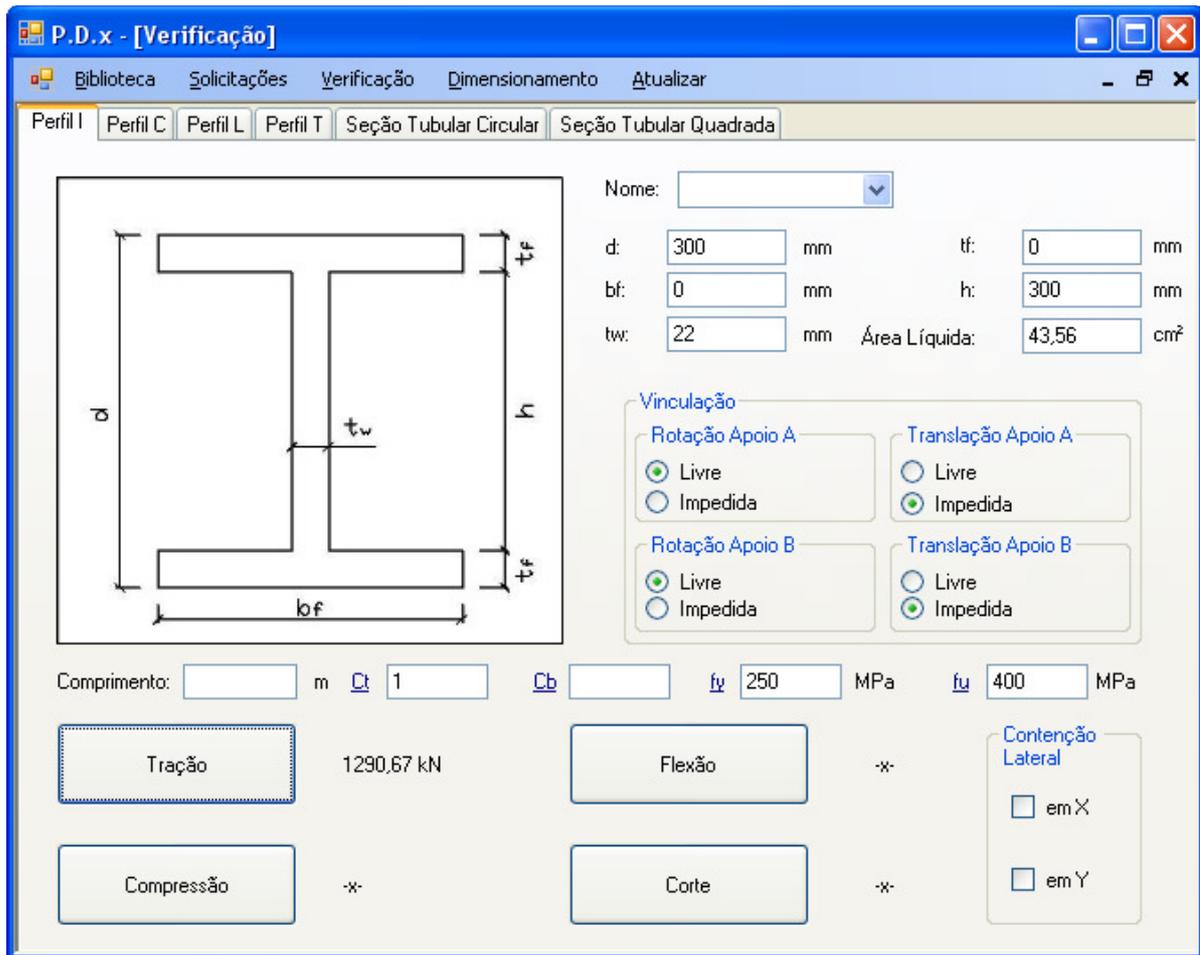


Figura 18: validação do programa para o esforço de tração

#### 4.7.2 Verificação para o esforço de compressão

Também se optou por um exemplo do livro do livro de Pfeil e Pfeil (2009, p. 150), ilustrado na figura 19 e de enunciado:

Uma coluna tem seção em forma de perfil H, fabricado com duas chapas 8 mm x 300 mm para as mesas e uma chapa 8 mm x 400 mm para a alma, todas em aço ASTM A36. O comprimento de flambagem é  $KL=9,8$  m. Calcular a resistência de cálculo para compressão axial, considerando flambagem em torno do eixo mais resistente (x-x). Admite-se que a peça tenha contenção lateral impedindo a flambagem em torno do eixo de menos resistência (y-y).

A solução apresentada foi (Pfeil; Pfeil, 2009, p. 150):

Propriedades geométricas da seção:

$$A_g = 2 \times 0,8 \times 30 + 0,4 \times 40 = 80 \text{ cm}^2 \quad (\text{equação 91})$$

$$I_x = 2 \times 0,8 \times 30 \times 20,4^2 + 0,8 \times \frac{40^3}{12} = 24.242 \text{ cm}^4 \quad (\text{equação 92})$$

$$i_x = \sqrt{I/A} = 17,4 \text{ cm} \quad (\text{equação 93})$$

Cálculo de  $N_{c,Rd}$  sem consideração de flambagem local ( $Q=1$ ):

$$\left(\frac{KL}{i}\right) = \frac{980}{17,4} = 56,3 \therefore \lambda_0 = 0,0113 \times 56,3 = 0,636 \quad (\text{equação 94})$$

$$f_c = 0,842 \times 250 = 210,5 \text{ MPa} \quad (\text{equação 95})$$

$$N_{c,Rd} = 80 \times \frac{21}{1,10} = 1527 \text{ kN} \quad (\text{equação 96})$$

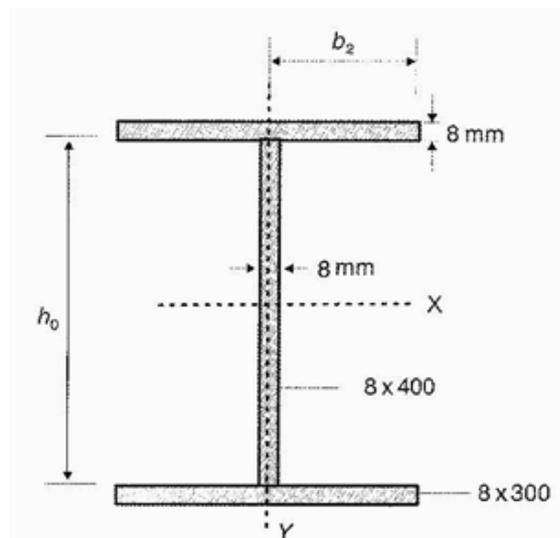


Figura 19: exemplo de solicitação à compressão (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 150)

Os dados de entrada bem como o resultado encontrado pelo programa estão expostos na figura 20. Nesse caso, como o problema fornecia o produto  $KL$ , adotou-se o comprimento de 9,8 metros e se ajustou as vinculações para que o coeficiente de flambagem fosse igual a um.

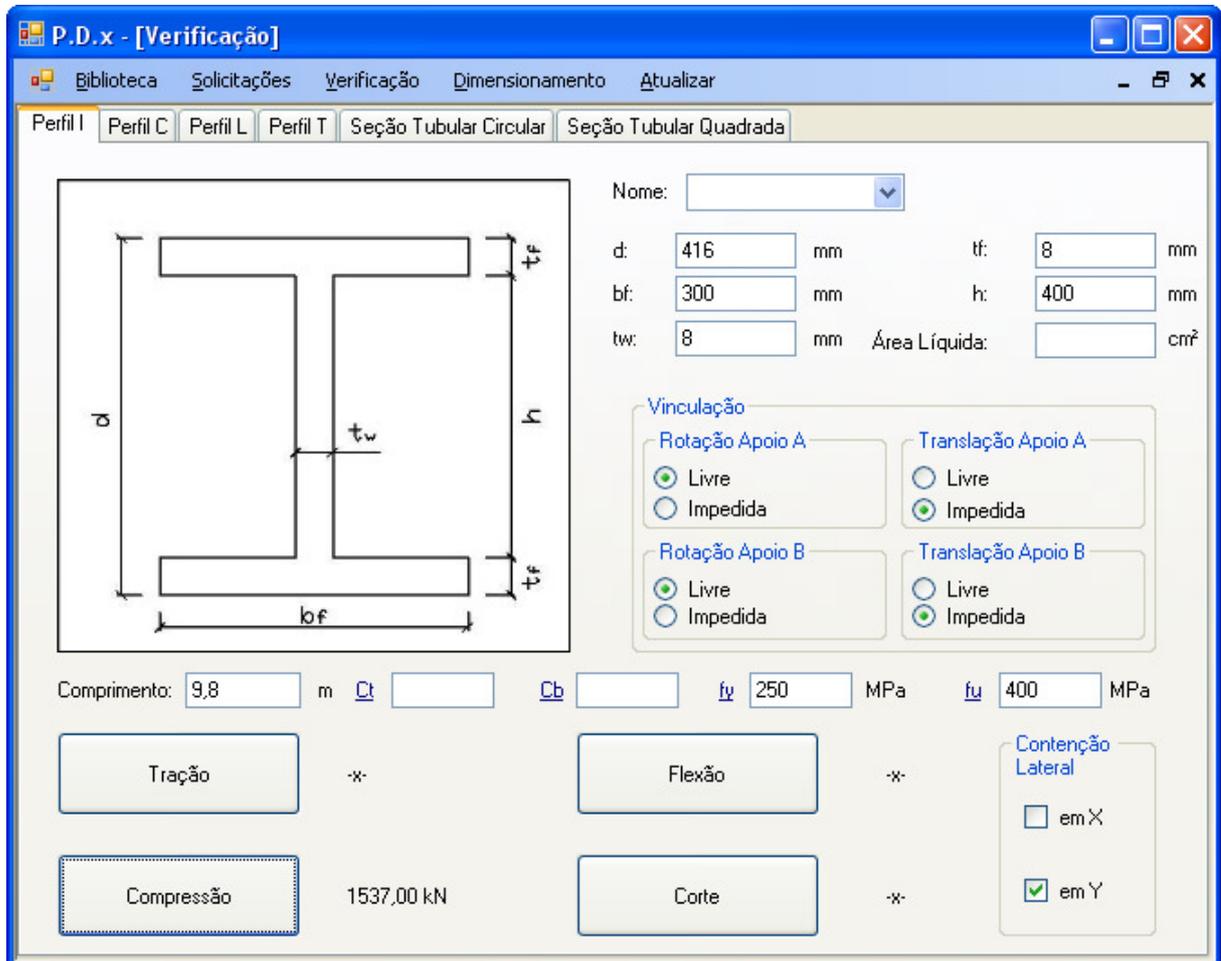


Figura 20: validação do programa para o esforço de compressão

Assim como no exemplo anterior, encontrou-se uma pequena diferença entre os resultado obtido no exemplo e o obtido com o auxílio do programa também atribuída a diferença de precisão dos dois métodos de cálculo. Cabe ressaltar que a opção **Contenção Lateral em Y** foi marcada, caso contrário o resultado apresentado pelo programa seria inferior, uma vez que a resistência à flambagem em relação ao eixo  $y$  é bem inferior devido à sua menor inércia.

### 4.7.3 Verificação para o esforço de flexão e de cisalhamento

O exemplo apresentado foi retirado do livro de Pfeil e Pfeil (2009, p. 199). Tendo como enunciado:

Uma viga I soldada em aço MR250, representada na figura [21], tem as seguintes condicionantes: vão 22 m; altura da alma 2 m; largura das mesas 0,60 m; contenção lateral das mesas nos apoios e no meio do vão; carga distribuída variável 110 kN/m, mais o peso próprio da viga. Verificar se o dimensionamento é satisfatório.

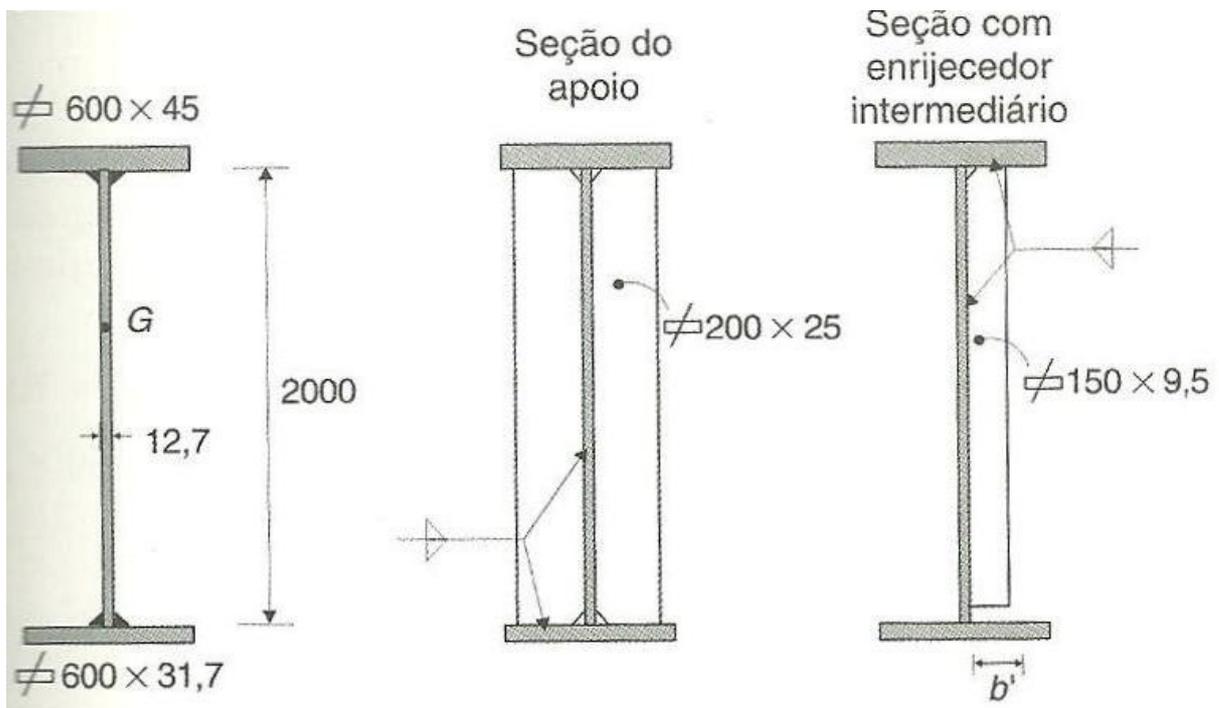


Figura 21: exemplo de solicitação à flexão e ao corte (PFEIL: PFEIL, 2009, p. 199)

A solução apresentada foi (Pfeil; Pfeil, 2009, p. 199-201):

Características geométricas da seção:

$$A = 710,6 \text{ cm}^2 \quad (\text{equação 97})$$

$$y_c = 93,3 \text{ cm} \quad (\text{equação 98})$$

$$I_x = 5.505.581 \text{ cm}^4 \quad (\text{equação 99})$$

$$W_c = 59.007 \text{ cm}^3 \quad (\text{equação 100})$$

$$C_w = 1.382.801 \times 10^3 \text{ cm}^6 \quad (\text{equação 101})$$

$$J = 2524 \text{ cm}^4 \quad (\text{equação 102})$$

$$h = 207,6 \text{ cm} \quad (\text{equação 103})$$

$$y_t = 114,3 \text{ cm} \quad (\text{equação 104})$$

$$I_y = 136.980 \text{ cm}^4 \quad (\text{equação 105})$$

$$W_t = 48.168 \text{ cm}^3 \quad (\text{equação 106})$$

Momento resistente de projeto considerando efeito de flambagem local da alma:

$$M_p = 14.527 \text{ kNm} \quad (\text{equação 107})$$

$$M_r = 12.042 \text{ kNm} \quad (\text{equação 108})$$

$$\lambda_p = 115,2 \quad (\text{equação 109})$$

$$M_n = 12.328 \text{ kNm} \quad (\text{equação 110})$$

$$M_{Rd} = 11.207 \text{ kNm} \quad (\text{equação 111})$$

Momento resistente de projeto com flambagem lateral:

$$M_n = 13.115 \text{ kNm} \quad (\text{equação 112})$$

$$M_{Rd} = 11.923 \text{ kNm} \quad (\text{equação 113})$$

Sendo adotado como valor para o momento resistente  $M_{Rd} = 11.207 \text{ kNm}$ .

Para resolver o problema utilizando o programa (figura 22), foi adotado um comprimento de 11 metros, pois a viga apresenta contenção lateral na sua seção central. Também é importante ressaltar que mesmo com a contenção lateral não foi marcada a opção que indica sua existência, isso pois ela é pontual, ou seja, não está presente ao longo da peça.

Figura 22: validação do programa para o esforço de flexão

Para a flexão também notamos uma diferença inferior a 1% entre o resultado encontrado pelo programa e o resultado encontrado no livro, igualmente atribuída à diferença na precisão dos dois métodos de cálculo. O próximo caso é de solicitação cortante, cujo enunciado é o mesmo do problema de flexão, cuja solução apresentada foi (Pfeil; Pfeil, 2009, p. 202):

$$\frac{h_0}{t_0} > 3,06 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 86,5 \quad (\text{equação 114})$$

$$C_v = \frac{7,55}{157,5^2} \times \frac{200.000}{250} = 0,24 \quad (\text{equação 115})$$

$$V_{Rd} = 200 \times 1,27 \times 0,6 \times 25 \times \frac{0,24}{1,10} = 843 \text{ kN} \quad (\text{equação 116})$$

A solução deste problema resolvido pelo programa, bem como os dados de entrada são apresentados na figura 23. Cabe ressaltar que o exemplo do livro apresenta um método de cálculo diferente do apresentado neste trabalho, mesmo assim os resultados encontrados são semelhantes.

Figura 23: validação do programa para o esforço cortante

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem a função de fazer uma análise final da ferramenta computacional desenvolvida bem como do trabalho de diplomação como um todo. Também são sugeridas melhorias para o programa.

Ao longo do trabalho foi apresentada a maneira de se dimensionar um perfil de aço para os esforços de tração, compressão, flexão e cisalhamento individualmente, bem como as características e constantes do aço necessárias ao dimensionamento. Notou-se uma grande variedade de equações para calcular as resistências dos perfis solicitados aos diferentes esforços, cada uma para uma geometria específica, o que torna parte do problema no dimensionamento a correta escolhas das equações a serem usadas.

Quanto à ferramenta computacional desenvolvida, julga-se que objetivo principal foi atingido, uma vez que é capaz de determinar a resistência dos perfis metálicos com grande precisão, como foi comprovado no capítulo 4.7, e determinar qual o perfil ideal de acordo com a necessidade de resistência do usuário. Ressalta-se que é importante manter a biblioteca do programa atualizada, para que o *software* apresente como solução para a determinação do perfil ideal somente aqueles que estejam sendo atualmente produzidos e comercializados.

Apesar de bem sucedido, o programa desenvolvido ainda é simples, sendo seu uso indicado somente para fins acadêmicos ou análise de elementos isolados. Dessa forma, sugere-se para trabalhos futuros que a análise das solicitações seja desenvolvida para carregamentos genéricos e elementos hiperestáticos, que a biblioteca seja ampliada e mais tipos de perfis sejam integrados à ferramenta computacional e que seja verificada a interação das solicitações, como, por exemplo, os efeitos da flexão atuando simultaneamente com os da compressão.

## REFERÊNCIAS

AÇO MINAS GERAIS S/A. Divisão de Desenvolvimento e Promoção de Produtos.

**Princípios de projeto de estruturas em aço.** Belo Horizonte: Graphilivro, 1989.

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

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço:** projeto e cálculo. 5. ed. São Paulo: Pini, 2006.

GERE, J. M.; WEAVER, W. **Análise de Estruturas Reticuladas.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço:** dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.