

# Manual de Construção em Aço



## **Estruturas compostas por perfis formados a frio**

**Dimensionamento pelo método das  
larguras efetivas e aplicação conforme  
ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**

**ESTRUTURAS COMPOSTAS POR  
PERFIS FORMADOS A FRIO -  
DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DAS  
LARGURAS EFETIVAS E APLICAÇÃO  
CONFORME ABNT NBR 14762:2010 E ABNT  
NBR 6355:2012**

## **Série “Manual de Construção em Aço”**

- Galpões para Usos Gerais
- Ligações em Estruturas Metálicas
- Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço
- Alvenarias
- Painéis de Vedação
- Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço
- Tratamento de Superfície e Pintura
- Transporte e Montagem
- Steel Framing: Arquitetura
- Interfaces Aço-Concreto
- Steel Framing: Engenharia
- Pontes e viadutos em vigas mistas
- Treliças tipo Steel Joist
- Viabilidade Econômica
- Dimensionamento de Perfis Formados a Frio conforme NBR 14762 e NBR 6355 (CD)
- Projeto e Durabilidade
- Estruturas Mistas Vol. 1 e 2
- Prevenção contra Incêndio no Projeto de Arquitetura
- Projeto de Abertura em Almas de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto
- Estruturas compostas por perfis formados a frio. Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012

EDSON LUBAS SILVA  
IGOR PIERIN  
VALDIR PIGNATTA E SILVA

**ESTRUTURAS COMPOSTAS POR  
PERFIS FORMADOS A FRIO -  
DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DAS  
LARGURAS EFETIVAS E APLICAÇÃO  
CONFORME ABNT NBR 14762:2010 E ABNT  
NBR 6355:2012**

INSTITUTO AÇO BRASIL  
CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO

**RIO DE JANEIRO  
2014**

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por quaisquer meio, sem a prévia autorização desta Entidade.

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Informações do AçoBrasil/CBCA

S586e

Silva, Edson Lubas

Estruturas compostas por perfis formados a frio –Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012 / Edson Lubas Silva, Igor Pierin, Valdir Pignatta e Silva. -- Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2014.  
192p.; -- ( Série Manual de Construção em Aço)

Bibliografia

ISBN 978-85-89819-33-6

Livro eletrônico

Modo de acesso: [www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-manuais.php](http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-manuais.php)

1.Perfis a Frio 2. Processo de Fabricação 3. Barras Tracionadas 4.Barras Comprimidas I. Títulos (série) II. Pierin, Igor III. Silva, Valdir Pignatta e .

CDU 692(035)

Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço  
Av. Rio Branco, 181 / 28º Andar  
20040-007 - Rio de Janeiro - RJ  
e-mail: [cbca@acobrasil.org.br](mailto:cbca@acobrasil.org.br)  
site: [www.cbca-acobrasil.org.br](http://www.cbca-acobrasil.org.br)

## SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Fabricação e Padronização de Perfis Formados a Frio	17
2.1 - Processo de Fabricação	18
2.2 – Tipos de Aços	18
2.3 – Efeito do Dobramento na Resistência ao Escoamento	19
2.4 – Padronização dos Perfis Formados a Frio (ABNT NBR 6355:2012)	20
3. O Fenômeno da Instabilidade Local e o Método das Larguras Efetivas	23
3.1 – Considerações sobre Instabilidade e Flambagem	24
3.2 – Método das Larguras Efetivas	25
3.2.1 – Apresentação do MLE	25
3.2.2 – Fatores que Influenciam no Cálculo da Largura Efetiva	27
3.2.2.1 – Condição de Contorno	27
3.2.2.2 – Distribuição de Tensões	28
3.2.3 – Cálculo das Larguras Efetivas	28
3.3 – Métodos de Dimensionamento	30
3.4 – Elementos Comprimidos com Enrijecedor de Borda	32
4. Fenômenos de Instabilidades Global e Distorcional	35
5. Dimensionamento de Barras Tracionadas	41
Exemplo 01	44
Exemplo 02	44
Exemplo 03	45
6.- Dimensionamento de Barras Comprimidas	47
6.1 – Força Axial Resistente de Cálculo devido à Instabilidade da Barra por Flexão, por Torção ou por Flexotorção.	48
6.1.1 - Cálculo $N_e$ em Perfis com Dupla Simetria ou Simétricos em Relação a um Ponto	50
6.1.2 - Cálculo de $N_e$ em Perfis Monossimétricos	50
6.2 – Força Axial Resistente de Cálculo Devido à Instabilidade Distorcional da Barra.	50
Exemplo 04	51
Exemplo 05	53
Exemplo 06	55
7. Dimensionamento de Barras sob Flexão	57
7.1 – Início de Escoamento da Seção Efetiva	58
7.2 – Instabilidade Lateral com Torção	58
7.3 – Instabilidade por Distorção da Seção Transversal	62

---

Exemplo 07	62
Exemplo 08	70
7.4 – Força Cortante	70
7.5 – Momento Fletor e Força Cortante Combinados	71
Exemplo 09	71
8 – Dimensionamento de Barras Submetidas à Flexão Composta	73
Referências Bibliográficas	81
Anexo A - Torção em Perfis de Seção Aberta	83
Exemplo A.1 - Carregamentos Transversais fora do Centro de Torção	84
Exemplo A.2 - Torção	84
Exemplo A.2.1 - Torção Uniforme	85
Exemplo A.3 - Propriedades Setoriais	88
Anexo B - Forças Transversais não Paralelas a um dos Eixos Principais	93
Anexo C - Seções Transversais dos Perfis Formados a Frio Indicados na ABNT NBR 6355:2012	97
ANEXO D - Memorial de Cálculo Galpão de Pequeno Porte	115

## Lista de Símbolos

No que se refere aos perfis estruturais de aço formados a frio, abordados por este manual, os símbolos e seus respectivos significados são os seguintes:

### Letras romanas maiúsculas

A - área bruta da seção transversal da barra

- área estabelecida para cálculo de enrijecedores transversais

$A_{ef}$  - área efetiva da seção transversal da barra

$A_n$  - área líquida da seção transversal da barra na região da ligação

$A_{n0}$  - área líquida da seção transversal da barra fora da região da ligação

$A_s$  - área da seção transversal do enrijecedor de alma

C - parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento modificada

$C_b$  - fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme empregado na flexão simples

$C_m$  - fator empregado no cálculo do momento fletor solicitante na flexão composta

$C_s$  - fator empregado no cálculo do momento fletor crítico de flambagem lateral com torção

$C_t$  - coeficiente de redução usado no cálculo da área líquida efetiva

D - largura nominal do enrijecedor de borda

E - módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 000 MPa

$F_e$  - força crítica de flambagem elástica

G - módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77 000 MPa

$I_a$  - momento de inércia de referência do enrijecedor de borda

$I_s$  - momento de inércia da seção bruta do enrijecedor de borda, em torno do eixo que passa pelo seu próprio centro geométrico e paralelo ao elemento a ser enrijecido. A parte curva entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada

$I_x ; I_y$  - momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y, respectivamente

$I_t$  - momento de inércia à torção uniforme

$I_w$  - momento de inércia ao empenamento da seção transversal

$K_x L_x$  - comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x

$K_y L_y$  - comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y

$K_z L_z$  - comprimento efetivo de flambagem global por torção

L - distância entre pontos travados lateralmente da barra  
- comprimento da barra

$M_A$  - momento fletor solicitante, em módulo, no 1o. quarto do segmento analisado para FLT

$M_B$  - momento fletor solicitante, em módulo, no centro do segmento analisado para FLT

$M_C$  - momento fletor solicitante, em módulo, no 3o. quarto do segmento analisado para FLT

$M_{dist}$  - momento fletor crítico de flambagem distorcional elástica

$M_e$  - momento fletor crítico de flambagem lateral com torção

$M_{máx}$  - momento fletor solicitante máximo, em módulo, no segmento analisado para FLT

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

$M_{x,Rd}$ ;  $M_{y,Rd}$  - momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos principais x e y, respectivamente

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

$M_{x,Sd}$ ;  $M_{y,Sd}$  - momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos principais x e y, respectivamente

$M_{0,Rd}$  - momento fletor resistente de cálculo, obtido com base no início de escoamento da seção efetiva, conforme item 6.1

$M_1$ ;  $M_2$  - menor e maior momento fletor de extremidade da barra, respectivamente

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

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

$N_{dist}$  - força axial crítica de flambagem distorcional elástica

$N_e$  - força axial crítica de flambagem global elástica

$N_{ex}$ ;  $N_{ey}$  - forças axiais críticas de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente

$N_{ez}$  - força axial crítica de flambagem global elástica por torção

$N_{exz}$  - força axial crítica de flambagem global elástica por flexotorção

$N_{t,Rd}$  - 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

$W_x$  - módulo de resistência elástico da seção bruta em relação ao eixo x

$W_y$  - módulo de resistência elástico da seção bruta em relação ao eixo y

$W_c$  - módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida

$W_{c,ef}$  - módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida

$W_{ef}$  - módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra que atinge o escoamento

## Letras romanas minúsculas

a - distância entre enrijecedores transversais de alma

$a_m$  - largura da alma referente à linha média da seção

b - largura do elemento, é a dimensão plana do elemento sem incluir dobras

$b_c$  - largura do trecho comprimido de elementos sob gradiente de tensões normais, conforme indicada nas Tabelas 3.2 e 3.3

$b_{ef}$  - largura efetiva

$b_{ef,1}$ ;  $b_{ef,2}$  - larguras efetivas indicadas nas Tabelas 3.2 e 3.3

$b_f$  - largura nominal da mesa

$b_m$  - largura da mesa referente à linha média da seção

$b_w$  - largura nominal da alma

$c_m$  - largura do enrijecedor de borda referente à linha média da seção

$d$  - largura do enrijecedor de borda  
- diâmetro nominal do parafuso  
- altura da seção

$d_{ef}$  - largura efetiva do enrijecedor de borda

$d_f$  - diâmetro do furo

$d_s$  - largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda

$e_1$  ;  $e_2$  - distâncias do centro dos furos de extremidade às respectivas bordas, na direção perpendicular à sollicitação

$f_u$  - resistência à ruptura do aço na tração

$f_y$  - resistência ao escoamento do aço

$f_{yc}$  - resistência ao escoamento do aço na região das dobras do perfil

$g$  - espaçamento dos parafusos na direção perpendicular à sollicitação

$h$  - largura da alma (altura da parte plana da alma)

$j$  - parâmetro empregado no cálculo do momento fletor de flambagem global elástica

$k$  - coeficiente de flambagem (local) de chapa do elemento

$k_a$  - coeficiente de flambagem de referência

$k_v$  - coeficiente de flambagem local por cisalhamento

$n_f$  - quantidade de furos contidos na linha de ruptura

$q$  - valor de cálculo da força uniformemente distribuída de referência empregada no dimensionamento das ligações de barras compostas submetidas à flexão

$r$  - raio de giração da seção bruta

$r_e$  - raio externo de dobramento

$r_i$  - raio interno de dobramento

$r_o$  - raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção

$r_x$  - raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal  $x$

$r_y$  - raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal  $y$

$s$  - espaçamento dos parafusos na direção da sollicitação

$t$  - espessura da chapa ou do elemento  
- menor espessura da parte conectada

$x$  - excentricidade da ligação

$x_m$  - distância do centróide em relação à linha média da alma, na direção do eixo  $x$

$x_o$  - distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo  $x$

$y_o$  - distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo  $y$

### Letras gregas minúsculas

$\beta_w$  ;  $\beta_f$  ;  $\beta_l$  - parâmetros empregados no cálculo do momento fletor crítico de flambagem lateral com torção

$\gamma$  - coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral

$\lambda_{\text{dist}}$  - índice de esbeltez distorcional reduzido

$\lambda_p$  - índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa

$\lambda_{p0}$  - valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento

$\lambda_0$  - índice de esbeltez reduzido

$\theta$  - ângulo entre o plano da mesa e o plano do enrijecedor de borda simples

$\chi$  - fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à instabilidade global

$\chi_{\text{dist}}$  - fator de redução do esforço resistente, associado à instabilidade distorcional

$\chi_{\text{FLT}}$  - fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção

$\sigma$  - tensão normal, em geral

$\sigma_n$  - tensão normal de compressão calculada com base nas combinações de ações para os estados-limites de serviço

$\psi$  - relação  $\sigma_2/\sigma_1$  empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local

## Apresentação

O CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço tem a satisfação de oferecer aos profissionais envolvidos com o emprego do aço na construção civil mais este manual, de uma série cujo objetivo é a disseminação de informações técnicas e as melhores práticas relacionadas à construção em aço.

Este manual trata do dimensionamento de perfis estruturais de aço fabricados a partir do dobramento de chapas denominados perfis formados a frio, tendo por base, as normas brasileiras ABNT NBR 14762:2010 - “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” e ABNT NBR 6355:2012 - “Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização”.

Os perfis de aço formados a frio são cada vez mais viáveis para uso na construção civil, em vista da rapidez e economia exigidas pelo mercado. Esse elemento estrutural pode ser eficientemente utilizado em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, em casas populares e edifícios de pequeno porte. Tem sido crescente o uso em light steel framing que são painéis estruturados por perfis formados a frio.

Como toda estrutura feita de aço, a construção pré-fabricada com perfis formados a frio possui um tempo reduzido de execução. Sendo compostos por chapas finas, possui leveza, facilidade de fabricação, de manuseio e de transporte, facilitando e diminuindo o custo de sua montagem – menor gasto com transporte, além de não necessitar maquinários pesados para içamento.

Neste manual, procura-se apresentar de forma didática e prática os fundamentos teóricos e elucidar a norma brasileira para o dimensionamento de perfis de aço formados a frio: ABNT NBR 14762:2010. O objetivo é que o manual seja utilizado juntamente com a norma brasileira, pois ele não abrange todos os aspectos de dimensionamentos descritos na norma, mas ajuda no entendimento das questões conceituais mais importantes.

Espera-se que esse conhecimento proporcione aos engenheiros melhores condições para a avaliação da viabilidade econômica de uma edificação, incluindo uma opção a mais na concepção estrutural do projeto: os perfis formados a frio de aço.

Para um entendimento geral do comportamento de um perfil de seção aberta, mostram-se no Anexo A de forma simples e intuitiva, aspectos relacionados à torção e no Anexo B o efeito de forças aplicadas em direções não paralelas aos eixos principais da seção transversal. No Anexo C apresentam-se os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012. E, finalmente, no Anexo D apresenta-se um exemplo prático completo, de dimensionamento de uma edificação em aço utilizando-se perfis formados a frio.

Acompanha também este manual, o programa DimPerfil 4.0 concebido com foco nas normas ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012 para calcular os esforços resistentes em barras isoladas, bem como as propriedades geométricas da seção bruta e efetiva que serão usadas no cálculo de deslocamentos.

Centro dinâmico de serviços, capacitado para conduzir e fomentar uma política de promoção do uso do aço na construção com foco exclusivamente técnico, o CBCA está seguro de que este manual enquadra-se no objetivo de contribuir para a difusão de competência técnica e empresarial no País.



# *Capítulo 1*

---

Introdução

### 1.1 - Introdução

Este manual trata do dimensionamento de perfis estruturais de aço fabricados a partir do dobramento de chapas denominados perfis formados a frio. Tem por base as normas brasileiras ABNT NBR 14762:2010 - “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” e ABNT NBR 6355:2012 - “Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização”. Ao final será apresentado um exemplo prático completo de uma cobertura de aço.

Os perfis de aço formados a frio são cada vez mais viáveis para uso na construção civil, em vista da rapidez e economia exigidas pelo mercado. Esse elemento estrutural pode ser eficientemente utilizado em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, em casas populares e edifícios de pequeno porte. Tem sido crescente o uso em *light steel framing* que são painéis estruturados por perfis formados a frio.

A maleabilidade das chapas finas de aço permite a fabricação de grande variedade de seções transversais, desde a mais simples cantoneira (seção em forma de L), eficiente para trabalhar à tração, até os perfis formados a frio duplos, em seção unicelular, também conhecidos como seção-caixão, que devido à boa rigidez à torção (eliminando travamentos), menor área exposta, (reduzindo a área de pintura) e menor área de estagnação de líquidos ou detritos (reduzindo a probabilidade de corrosão) oferecem boas soluções econômicas.

Como toda estrutura feita de aço, a construção pré-fabricada com perfis formados a frio possui um tempo reduzido de execução. Sendo compostos por chapas finas, possuem leveza, facilidade de fabricação, de manuseio e de transporte, facilitando e diminuindo o custo de sua montagem – menor gasto com transporte, além de não necessitar maquinários pesados para içamento.

Entretanto, para o correto dimensionamento desse elemento é necessário conhecer

com detalhes o seu comportamento estrutural, pois possui algumas particularidades em relação às demais estruturas, tais como as de concreto ou mesmo as compostas por perfis soldados ou laminados de aço. Por serem constituídas de perfis com seções abertas e de pequena espessura, as barras, que possuem baixa rigidez à torção, podem ter problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço devido a esforços de torção. Essa susceptibilidade à torção ocorre até mesmo em carregamentos aplicados no centro geométrico da seção transversal de vigas e de pilares, podendo tornar-se crítico caso a estrutura não seja projetada adequadamente. Os conhecimentos dos esforços internos clássicos, ensinados nos cursos de resistência de materiais, momentos fletores em torno dos eixos  $x$  e  $y$ , momento de torção e esforços cortantes paralelos aos eixos  $x$  e  $y$ , não são suficientes para compreender o comportamento das estruturas de seção aberta formadas por chapas finas. É necessário entender também outro tipo de fenômeno que ocorre nessas estruturas: o empenamento. A restrição ao empenamento causa esforços internos e o entendimento desses esforços é muito importante e nem sempre é trivial. Para uma simples ilustração, pode-se citar que uma força de tração aplicada no centro geométrico da seção transversal de um tirante constituído de um perfil Z pode produzir tensões de compressão nas mesas desse perfil. Outro fenômeno comum nos perfis de seção aberta é a distorção da seção transversal, que consiste em um modo de instabilidade estrutural onde a seção transversal perde sua forma inicial quando submetida a tensões de compressão, causando perda significativa na sua capacidade de resistir aos esforços.

Neste manual, procura-se apresentar de forma didática e prática os fundamentos teóricos e elucidar a norma brasileira para o dimensionamento de perfis de aço formados a frio: ABNT NBR 14762:2010. O objetivo é que este texto seja utilizado juntamente com a

norma brasileira, pois ele não abrange todos os aspectos de dimensionamentos descritos na norma, mas ajuda no entendimento das questões conceituais mais importantes.

Espera-se que esse conhecimento proporcione aos engenheiros melhores condições para a avaliação da viabilidade econômica de uma edificação, incluindo uma opção a mais na concepção estrutural do projeto: os perfis formados a frio de aço.

No capítulo 2 são apresentadas algumas informações sobre processos de fabricação e padronização de perfis formados a frio. No capítulo 3, discorre-se de forma detalhada, sobre o fenômeno da instabilidade local e sobre o método das larguras efetivas, procedimento simplificado para considerar-se a instabilidade no dimensionamento do perfil. No capítulo 4, discorre-se sobre os fenômenos de instabilidade global, quais sejam a instabilidade lateral com torção das vigas e a instabilidade por flexão, torção ou flexotorção de pilares e considerações sobre a instabilidade distorcional das seções transversais. Nos capítulos 5 e 6 são apresentados os procedimentos de dimensionamento dos perfis formados a frio submetidos à tração e à compressão. O procedimento de dimensionamento de elementos fletidos está apresentado no capítulo 7. No capítulo 8 é apresentado o dimensionamento de barras submetidas à flexão composta. Fluxogramas de dimensionamento conforme a ABNT NBR 14762:2010 também são apresentados no capítulo 8.

A capacidade resistente das barras considerando as instabilidades globais relacionadas com a torção está diretamente associada à rigidez à flexão  $E.I_y$ , e à rigidez à torção da seção. A parcela da torção, em especial, depende não apenas do termo correspondente à chamada torção de Saint Venant,  $G.I_t$ , mas igualmente da rigidez ao empenamento da seção,  $E.I_w$ . Quanto mais finas as paredes da seção do perfil, menores os valores das propriedades  $I_t$  e  $I_w$ . Essas parcelas são proporcionais ao cubo da espessura  $t$  das paredes, sofrendo grandes

variações para pequenas alterações no valor da espessura. Além dos fenômenos de instabilidade, a barra pode estar sujeita à torção.

Nas vigas em que os carregamentos não são aplicados no centro de torção da seção, ocorre torção. As teorias de barras de Euler e de Timoshenko, comumente ensinadas nos cursos de Resistência dos Materiais, não abrangem esse comportamento das barras com seção aberta.

Para um entendimento geral do comportamento de um perfil de seção aberta, mostram-se no Anexo A de forma simples e intuitiva, aspectos relacionados à torção e no Anexo B o efeito de forças aplicadas em direções não paralelas aos eixos principais da seção transversal. No Anexo C apresentam-se os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012. Finalmente, no Anexo D apresenta-se o dimensionamento de uma edificação em perfis formados a frio.



# ***Capítulo 2***

---

Fabricação e Padronização  
de Perfis Formados a Frio

# Fabricação e padronização de perfis formados a frio

## 2.1 - Processo de Fabricação

Dois são os processos de fabricação dos perfis formados a frio: contínuo e descontínuo.

O processo contínuo, adequado à fabricação em série, é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço, sobre os roletes de uma linha de perfilação. Os roletes vão conferindo gradativamente à chapa, a forma definitiva do perfil. Quando o perfil deixa a linha de perfilação, ele é cortado no comprimento indicado no projeto.

O processo descontínuo, adequado a pequenas quantidades de perfis, é realizado mediante o emprego de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra. Várias operações similares a essa, sobre a mesma chapa, fornecem à seção do perfil a geometria exigida no projeto. O comprimento do perfil está limitado à largura da prensa.

O processo contínuo é utilizado por fabricantes especializados em perfis formados a frio e o processo descontínuo é geralmente utilizado pelos fabricantes de estruturas metálicas.

## 2.2 – Tipos de Aços

A NBR 14762:2010 “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento” recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento  $f_u/f_y$  maior ou igual a 1,08, e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370. A Tabela 2.1 apresenta os valores nominais mínimos da resistência ao escoamento ( $f_y$ ) e da resistência à ruptura ( $f_u$ ) de aços relacionados por Normas brasileiras referentes a chapas finas para uso estrutural.

Tabela 2.1 – Chapas finas de aço especificadas por Normas brasileiras para uso estrutural

Especificação	Grau	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
ABNT NBR 6649 /	CF-24	240	400
ABNT NBR 6650	CF-26	260/260	400/410
Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 /	CFR 400	---/250	---/380
ABNT NBR 5921	CFR 500	310/370	450/490
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica			
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450

A utilização de aços sem qualificação estrutural para perfis é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa e 300 MPa para a resistência ao escoamento  $f_y$  e a resistência à ruptura  $f_u$ , respectivamente.

### 2.3 – Efeito do Dobramento na Resistência ao Escoamento

O dobramento de uma chapa provoca uma estricção na região da dobra. No entanto, a variação nas dimensões da seção decorrente dessa estricção pode ser desconsiderada para efeito de dimensionamento.

O dobramento de uma chapa, seja por perfilação ou utilizando-se dobradeira, provoca, devido ao fenômeno conhecido como envelhecimento (carregamento até a zona plástica, descarregamento, e posterior carregamento, porém não imediato), um aumento da resistência ao escoamento ( $f_y$ ) e da resistência à ruptura ( $f_u$ ), com conseqüente redução de ductilidade, isto é, o diagrama tensão-deformação sofre uma elevação na direção das resistências-límites, mas acompanhado de um estreitamento no patamar de escoamento. A redução de ductilidade significa uma menor capacidade de o material se deformar; por essa razão, a chapa deve ser conformada com raio de dobramento adequado ao material e a sua espessura, a fim de se evitar o aparecimento de fissuras.

O aumento das resistências ao escoamento e à ruptura se concentra na região das curvas quando o processo é descontínuo, pois apenas a região da curva está sob carregamento. No processo contínuo esse acréscimo atinge outras regiões do perfil, pois na linha de perfilação toda a parte do perfil entre roletes está sob tensão.

O aumento da resistência ao escoamento pode ser utilizado no dimensionamento de barras submetidas à compressão ou à flexão, que não estejam sujeitas à redução de capacidade devido à instabilidade local, conforme a equação 2.1.

$$\frac{\Delta f_y}{f_y} = C \left( \frac{f_{yc}}{f_y} - 1 \right)$$

(eq. 2.1) sendo:

$$\frac{f_{yc}}{f_y} = \frac{3,69 \left( \frac{f_u}{f_y} \right) - 0,819 \cdot \left( \frac{f_u}{f_y} \right)^2 - 1,79}{\left( \frac{r}{t} \right)^{0,192} \cdot \left( \frac{f_u}{f_y} \right) - 0,068}$$

$\Delta f_y$  - acréscimo permitido à  $f_y$

$f_y$  - resistência ao escoamento do aço virgem

$f_{yc}$  - resistência ao escoamento na região da curva

$f_u$  - resistência à ruptura do aço virgem

$r$  - raio interno de dobramento;

$t$  - espessura.

$C$  - relação entre a área total das dobras e a área total da seção para barras submetidas à compressão; ou a relação entre a área das dobras da mesa comprimida e a área total da mesa comprimida para barras submetidas à flexão

Apresentam-se na Tabela 2.2 alguns valores de  $\Delta f_y$ , em função de  $C$ , para aço com  $f_y = 250$  MPa ( $f_u = 360$  MPa),  $f_y = 300$  MPa ( $f_u = 400$  MPa) e  $f_y = 355$  MPa ( $f_u = 490$  MPa).

Tabela 2.2 - Valores de  $\Delta f_y$

	$f_y = 250$ MPa, $f_u = 360$ MPa, $r = t$	$f_y = 300$ MPa, $f_u = 400$ MPa, $r = t$	$f_y = 355$ MPa, $f_u = 490$ MPa, $r = 1,5 t$
$C$	$\Delta f_y$ (MPa)		
0,01	2	2	2
0,02	4	4	5
0,05	10	10	12
0,10	21	20	24
0,15	31	30	37

Atenção especial deve ser dada ao cálculo das características geométricas dos perfis formados a frio. A existência da curva, no lugar do "ângulo reto", faz com que os valores das características geométricas (área, momento de inércia, módulo resistente, etc.) possam ser, dependendo das dimensões da seção, sensivelmente reduzidos.

## 2.4 – Padronização dos Perfis Formados a Frio

A Norma ABNT NBR 6355:2012 – “Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização” estabelece os requisitos exigíveis dos perfis estruturais de aço formados a frio, com seção transversal aberta, tais como tolerâncias dimensionais, aspectos superficiais, acondicionamento, inspeção, etc.

A Norma brasileira apresenta uma série comercial de perfis formados com chapas de espessuras entre 0,43 mm a 8,0 mm, indicando suas características geométricas, pesos e tolerâncias de fabricação.

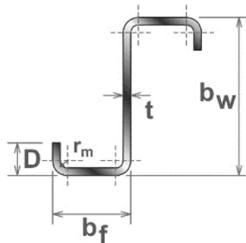
A designação normatizada para os perfis é feita da seguinte forma: tipo do perfil × dimensões dos lados × espessura, todas as dimensões são dadas em mm. A Tabela 2.3 mostra os tipos de perfis e forma de nomenclatura dos elementos.

No anexo C apresentam-se as seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012.

Tabela 2.3 – Perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012

Série	Seção transversal	Designação
Cantoneira de abas iguais		<p><b>L</b> <math>b_f \times t</math>                      Ex: <b>L</b> 50 × 3,00</p>
U simples		<p><b>U</b> <math>b_w \times b_f \times t</math>                      Ex: <b>U</b> 150 × 50 × 2,65</p>
U enrijecido		<p><b>Ue</b> <math>b_w \times b_f \times D \times t</math>                      Ex: <b>Ue</b> 150 × 60 × 20 × 2,65</p>

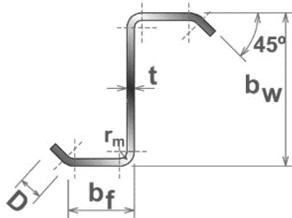
Z enrijecido a 90°



$$\mathbf{Z_{90}} \ b_w \times b_f \times D \times t$$

Ex:  $\mathbf{Z_{90}} \ 200 \times 75 \times 20 \times 2,25$

Z enrijecido a 45°



$$\mathbf{Z_{45}} \ b_w \times b_f \times D \times t$$

Ex:  $\mathbf{Z_{45}} \ 200 \times 75 \times 20 \times 2,25$



# ***Capítulo 3***

---

O Fenômeno da Instabilidade  
Local e o Método Das Larguras  
Efetivas

## 3.1 – Considerações sobre Instabilidade e Flambagem

Cabe aqui uma consideração sobre nomenclatura que, por vezes, afeta o entendimento conceitual do fenômeno da flambagem. Iniciando-se pela flambagem global, tome-se um pilar ideal, absolutamente reto, sem imperfeições de fabricação e submetido a uma força aplicada perfeitamente centrada  $F$ . Incremente-se essa força gradativamente até atingir a chamada força crítica de flambagem elástica,  $F_e$ , o pilar pode se manter na posição reta, de equilíbrio instável, ou, se houver uma perturbação, por menor que seja, procurar uma posição de equilíbrio estável, como se pode ver na Figura 3.1. Há, portanto duas soluções teóricas de equilíbrio.

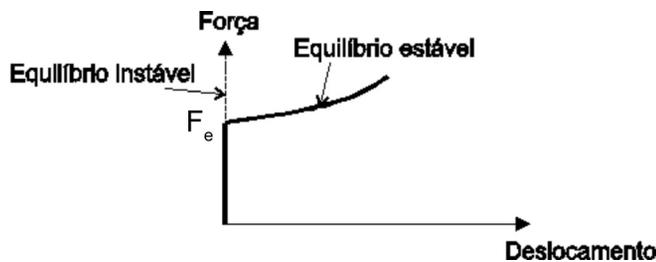


Figura 3.1 - Gráfico força versus deslocamento para material elástico-linear.

Tome-se, agora, um pilar real, com imperfeições geométricas. Novamente, aplica-se uma força perfeitamente axial. Ao se incrementar o carregamento, a presença de imperfeições causará flexão. Assim, desde o início, o pilar real estará submetido à flexão-composta e o estado-limite último poderá ser alcançado para valores inferiores ao da força axial crítica. Na Figura 3.2 se apresenta a relação força-deslocamento de barras com imperfeições, para materiais com vários diagramas tensão-deformação.

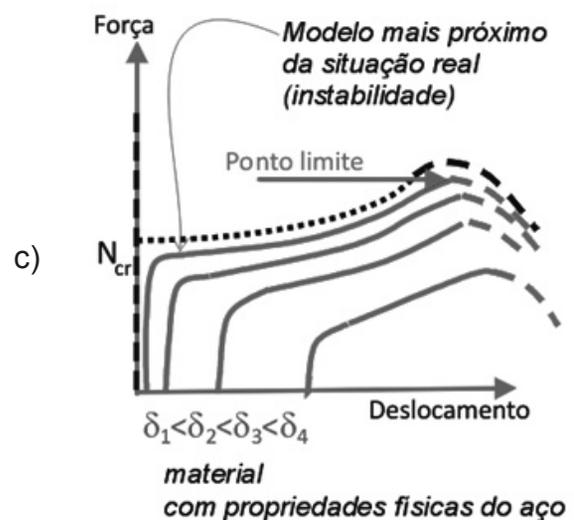
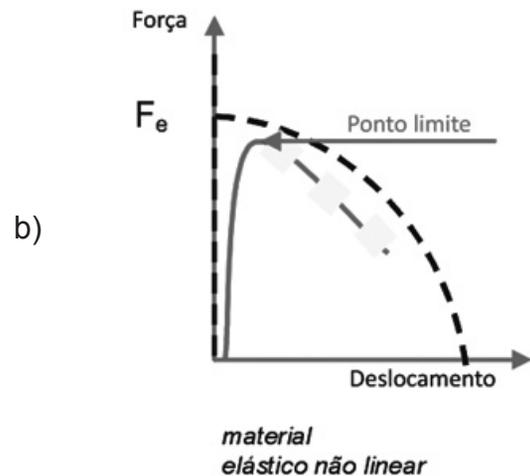
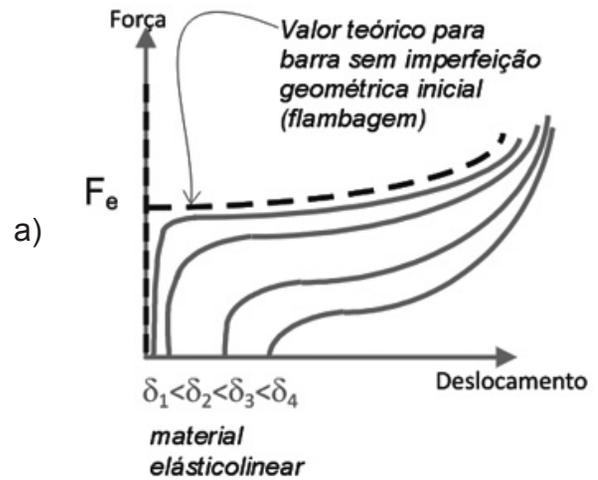


Figura 3.2 - Gráfico força versus deslocamento de pilares com imperfeições geométricas

Em termos mais simples, há uma diferença conceitual entre a resposta estrutural de um pilar ideal e a de um pilar real, imperfeito, mesmo que ambos estejam sujeitos apenas à força axial.

Para que não haja conflito de entendimento entre os dois comportamentos distintos, as principais Escolas brasileiras denominam flambagem ao fenômeno do aparecimento de um ponto de bifurcação no diagrama força  $\times$  deslocamento de um ponto de uma barra ou chapa comprimida. Em elementos estruturais reais, na presença de imperfeições, não ocorre ponto de bifurcação e, portanto, não ocorre flambagem. Em outras palavras, distingue-se a flambagem da flexão composta. Como, geralmente, as imperfeições das estruturas de aço são de pequeno valor, os modos de deformação das barras de aço lembram os modos de flambagem. Por isso, é importante nos cursos de graduação o estudo do fenômeno teórico da flambagem, para depois se entender o comportamento das estruturas reais.

Neste manual, o termo “flambagem” será empregado quando se referir ao fenômeno como aqui definido, geralmente são grandezas auxiliares, tais como coeficiente de flambagem ou força crítica de flambagem. O fenômeno da ocorrência, em estruturas reais, de deformações transversais aos esforços aplicados, será denominado genericamente de instabilidade.

A mesma explicação sobre instabilidade/flambagem global se estende à instabilidade/flambagem local. A denominação “flambagem local” deve ser aplicada tão somente a chapas ideais, inexistentes na natureza. Em estruturas reais, o fenômeno chama-se instabilidade local.

Deixa-se claro que a ABNT NBR 14762:2010 nem sempre foi rigorosa na nomenclatura adotada. Assim, é possível, que haja alguma discordância entre a terminologia empregada neste manual, conforme as explicações conceituais anteriormente fornecidas e a Norma. Isso nada altera a formulação apresentada.

## 3.2– Método Das Larguras Efetivas

### 3.2.1 – Apresentação do MLE

O método das larguras efetivas é muito mais trabalhoso do que o método das seções efetivas, por outro lado não há limitação quanto à seção transversal do perfil, pois é aplicado elemento a elemento (segundo a ABNT NBR 14762:2010, elemento é a parte constituinte de um perfil formado a frio - mesa, alma, enrijecedor). Por essa razão e com a elaboração do programa de computador DimPerfil 4.0 para agilizar os cálculos, para este manual, optou-se pelo MLE.

Para exemplificar o comportamento após a ocorrência da instabilidade local de uma chapa, considere uma placa quadrada simplesmente apoiada nas quatro bordas, sujeita a um esforço de compressão normal em dois lados opostos, como mostrado na Figura 3.3.

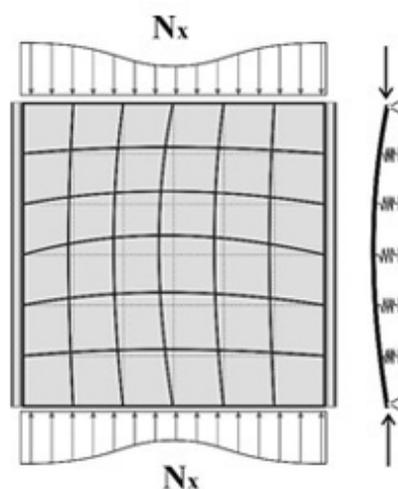


Figura 3.3 – Comportamento pós-crítico

Admitindo-se faixas como um sistema de grelha, nota-se que, as faixas horizontais contribuem para aumentar a rigidez à deformação das barras verticais comprimidas. Nesse modelo, as faixas horizontais se comportam como se fossem apoios elásticos distribuídos ao longo do comprimento das barras comprimidas. Quanto maior for a amplitude da deformação da barra comprimida, maior será

## O fenômeno da instabilidade local e o método das larguras efetivas

a contribuição das “molas” para trazê-la à posição vertical novamente. Essa condição estável após a deformação perpendicular ao seu plano é considerada no dimensionamento dos perfis formados a frio.

Esse conceito de grelha pode ser extrapolado para uma chapa retangular com a dimensão longitudinal muito maior do que a transversal, como é o caso dos perfis formados a frio, (ver a Figura 3.4). Nesse caso, a chapa apresentará comportamento equivalente a uma sucessão de chapas aproximadamente quadradas, sendo válido estender a conclusão sobre o comportamento das chapas quadradas às chapas longas.

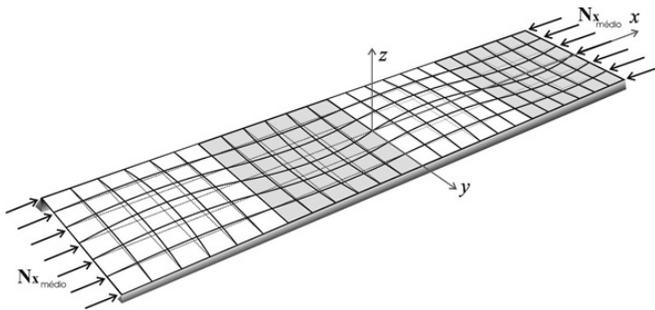


Figura 3.4 – Comportamento associado a grelha

A rigidez à deformação da chapa é maior junto aos apoios “atraindo” maiores tensões atuantes. O máximo esforço suportado pela chapa ocorre quando a tensão junto ao apoio atinge a resistência ao escoamento,  $f_y$ . A Figura 3.5 mostra a distribuição das tensões na chapa com o aumento gradual do carregamento aplicado. De início, a distribuição das tensões é uniforme com valor inferior ao da tensão crítica de flambagem, (ver a Figura 3.5a). Aumentando o carregamento a chapa se deforma e há uma redistribuição das tensões internas (ver a Figura 3.5b) até atingir a resistência ao escoamento,  $f_y$  (ver a Figura 3.5c).

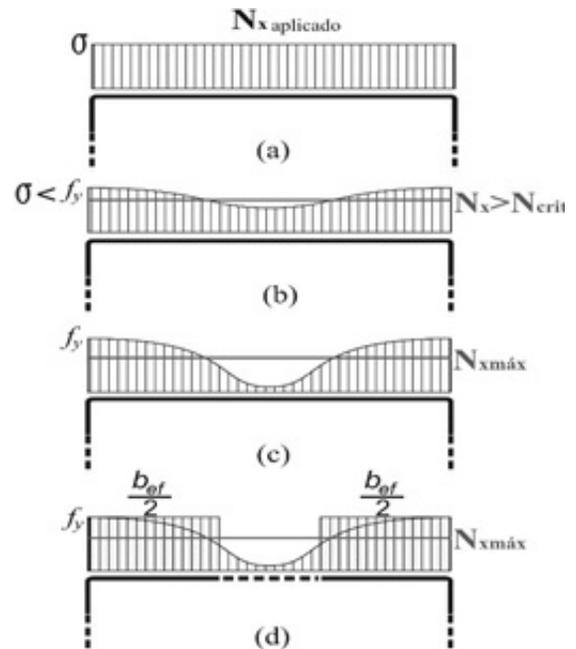


Figura 3.5 – Distribuição de tensões

O conceito de larguras efetivas consiste em substituir o diagrama da distribuição das tensões, que não é uniforme, por um diagrama uniforme de tensões. Admite-se que a distribuição de tensões seja uniforme ao longo da largura efetiva “ $b_{ef}$ ” fictícia com valor igual às tensões das bordas, conforme mostra a Figura 3.5d. A largura “ $b_{ef}$ ” é obtida de modo que a área sob a curva da distribuição não uniforme de tensões seja igual à soma de duas partes retangulares de largura total “ $b_{ef}$ ” e com intensidade “ $f_{máx}$ ”, conforme a equação 3.1.

$$\int_0^b \sigma t ds = b_{ef} f_{máx} \quad (\text{eq. 3.1})$$

A distribuição de tensões em perfis que apresentam instabilidade distorcional é diferente dos perfis que se instabilizam localmente (Pierin, 2011). Assim, o conceito de largura efetiva não é aplicável na verificação da resistência da peça em relação à distorção da seção transversal. Desse modo, para a determinação do esforço resistente associado à instabilidade distorcional, torna-se necessário a obtenção da força crítica de flambagem distorcional elástica,  $N_{dist}$  e  $M_{dist}$ , por meio de análises de

estabilidade elástica, utilizando-se programas de computador, como por exemplo, o CUFSM (Ádány e Schafer, 2006) e o INSTAB (Pierin, 2011). Neste manual e no programa DimPerfil 4.0, os valores de  $N_{dist}$  e  $M_{dist}$  utilizados para realização dos cálculos, foram retirados de Pierin *et al* (2013).

### 3.2.2 – Fatores que Influenciam no Cálculo da Largura Efetiva

#### 3.2.2.1 – Condição de Contorno

A condição de contorno dos elementos de chapa, tal qual nas barras, influi na capacidade resistente.

A ABNT NBR 14762:2010 designa dois tipos de condições de contorno para os elementos de chapa, AA e AL, conforme exemplificado na Figura 3.6.

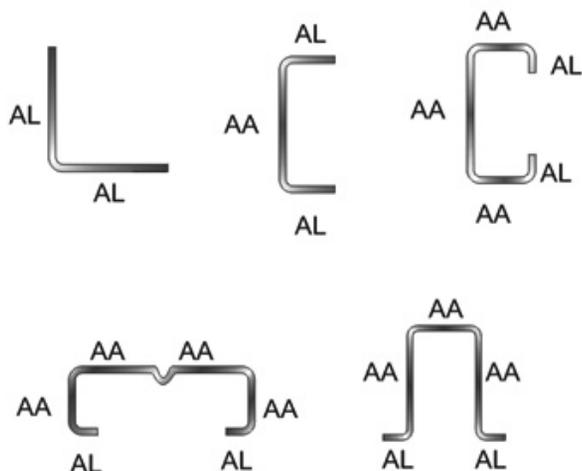


Figura 3.6 – Condição de contorno dos elementos

Os enrijecedores e as mesas não enrijecidas dos perfis de aço são elementos com um dos lados constituídos de borda livre, AL indicados na Figura 3.6. Essa condição reduz significativamente a capacidade resistente, pois, não ocorre na configuração deformada as diversas semiondas, o que aproxima seu comportamento ao de uma chapa quadrada e nem há colaboração de “barras horizontais” como em um modelo de grelha. Em elementos muito esbeltos, ou seja, com altos valores da relação largura/espessura, a largura efetiva calculada é muito pequena.

O coeficiente de flambagem de chapa,  $k$ , é o fator inserido nas expressões para o cálculo das larguras efetivas que quantifica as diversas condições de contorno e de carregamento das chapas. É obtido por meio da Teoria da Estabilidade Elástica. A Tabela 3.1 mostra alguns valores clássicos para o coeficiente  $k$ .

Os elementos com enrijecedores de borda não podem ser incondicionalmente considerados como biapoiados. O enrijecedor de borda pode não ser suficientemente rígido para se comportar como um apoio adequado e assim, comprometer a estabilidade da mesa enrijecida. A capacidade adequada de um enrijecedor depende essencialmente do seu momento de inércia,  $I_x$ , portanto, os valores da largura efetiva das mesas enrijecidas dos perfis dependem da dimensão  $D$  do enrijecedor. Por outro lado, o enrijecedor não deve ser muito esbelto, ou seja, ter a dimensão  $D$  elevada, porque ele próprio pode se instabilizar. O valor mais adequado para a largura do enrijecedor está entre 12% a 40% da mesa do perfil a ser enrijecida (Silva, 2006).

Tabela 3.1 – Valores de  $k$  para algumas condições de contorno e carregamento

$k = 4,0$	Elemento simplesmente apoiado (AA) submetido à compressão uniforme (p. ex. almas de perfis U ou Ue submetidos à tensões de compressão uniforme)
$k = 0,43$	Elemento com um bordo livre (AL) submetido à compressão uniforme (p. ex. mesas de perfis U ou abas de perfis L)
$k = 24$	Elemento simplesmente apoiado (AA) submetido à flexão pura (p. ex. almas de perfis U ou Ue submetidos a tensões de flexão)
$0,43 \leq k \leq 4,0$	Elemento com enrijecedor de borda (AA) (p. ex. mesas de perfis Ue ou Cr submetidos à tensões de compressão uniforme)

## 3.2.2.2 – Distribuição de Tensões

A forma da distribuição de tensões aplicada (ver a Figura 3.7) no elemento de chapa também influencia o cálculo da largura efetiva.

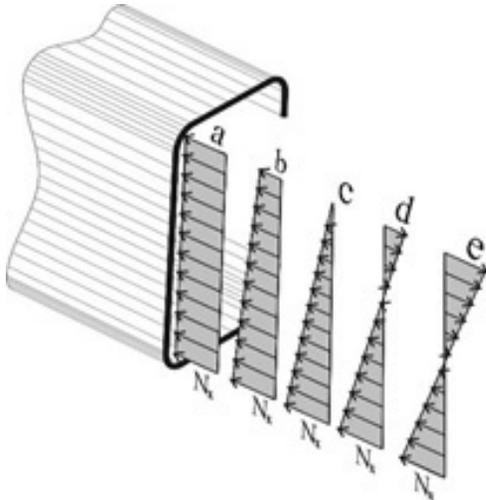


Figura 3.7 – Distribuição de tensões

Quando o carregamento na chapa não é uniforme, há uma diminuição dos esforços de compressão ao longo da borda carregada, conseqüentemente aumentando a largura efetiva calculada.

O valor da tensão, obviamente, é fundamental na determinação da largura efetiva. Altos valores de tensões atuantes conduzem a menores larguras efetivas.

## 3.2.3 – Cálculo das Larguras Efetivas

Calcula-se a largura efetiva de uma chapa comprimida (ABNT NBR 14762:2010 item 9.2.2) por meio da equação 3.2,

$$b_{ef} = \frac{b \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \leq b \quad (\text{eq. 3.2})$$

onde o índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_p$ ) é dado pela equação 3.3.

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{kE/\sigma}} \quad (\text{eq. 3.3})$$

Para  $\lambda_p \leq 0,673$ , tem-se  $b_{ef} = b$ .

Em que:

$b$  – largura do elemento

$t$  – espessura do elemento

$E$  – módulo de elasticidade do aço = 20.000 kN/cm<sup>2</sup>

$\sigma$  - tensão normal de compressão definida por:  $\sigma = \rho \cdot f_y$ , sendo  $\rho$  o fator de redução associado à compressão centrada e  $\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y$ , sendo  $\rho_{FLT}$  o fator de redução associado à flexão simples.

$k$  – coeficiente de flambagem local

Os valores do coeficiente de flambagem local  $k$ , para elementos classificados como AA e AL (ver a Figura 3.6) são dados nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Nos casos onde há tensões de tração e compressão no elemento, somente para elementos com borda livre, calcula-se as larguras efetivas, substituindo na equação, a largura total do elemento pela largura comprimida,  $b_c$ , conforme a equação 3.4 e Figura 3.8.

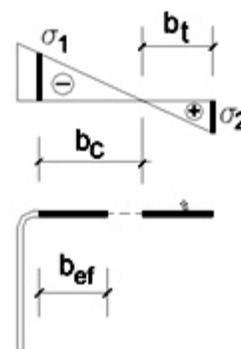


Figura 3.8 – Largura efetiva para elementos sob compressão e tração

$$b_{ef} = \frac{b_c \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \leq b \quad (\text{eq. 3.4})$$

onde  $b_c$  é o comprimento da parte comprimida do elemento AL.

As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram as equações para o cálculo do coeficiente de flambagem local  $k$ . Como era de se esperar o coeficiente  $k$  depende das condições de contorno e carregamentos dos elementos. A condição de carregamento é avaliada em função da relação entre a máxima e mínima tensão atuante no elemento.

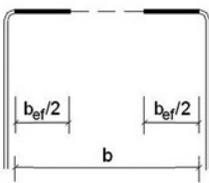
Para o cálculo dos deslocamentos, deve-se considerar também, a redução de rigidez à flexão da seção devido à instabilidade local. Para isso, utilizam-se as mesmas expressões do cálculo das larguras efetivas (equações 3.2 e 3.3) substituindo-se a máxima tensão permitida no elemento,  $\sigma_n$ , pela tensão de utilização,  $\sigma$ , que é a máxima tensão de compressão calculada para seção efetiva (portanto é necessário fazer interação), na qual se consideram as combinações de ações para os estados limites de serviço.

Tabela 3.2 – Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA (Fonte: ABNT NBR 14762:2010)

Caso a

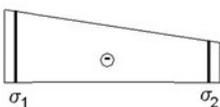


$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1,0$$



$$k = 4,0$$

Caso b

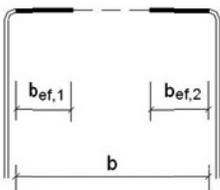


$$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$$

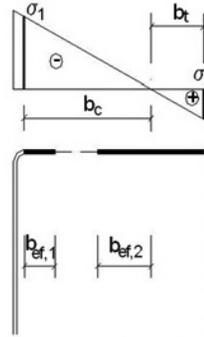
$$b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$$

$$b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$$

$$k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$$



Caso c



$$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$$

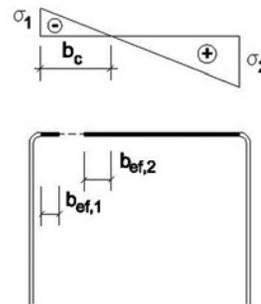
$$b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$$

$$b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$$

$$k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$$

Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva

Caso d



$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$$

$$b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$$

$$b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$$

$$\text{sendo } b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$$

$$k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$$

Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva

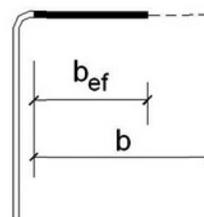
Nota: o sinal (-) indica compressão.

Tabela 3.3 – Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AL (Fonte: ABNT NBR 14762:2010)

Caso a



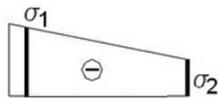
$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1,0$$



$$k = 0,43$$

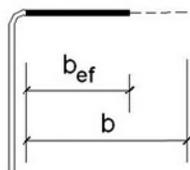
# O fenômeno da instabilidade local e o método das larguras efetivas

Caso b

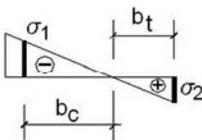


$$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$$

$$k = 0,578 / (\psi + 0,34)$$

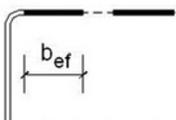


Caso c



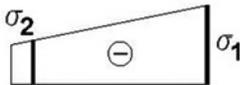
$$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$$

$$k = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$$



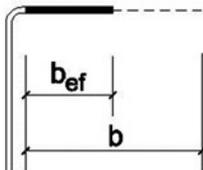
Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva

Caso d



$$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1,0$$

$$k = 0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$$



Nota: o sinal (-) indica compressão.

## 3.3 – Métodos de Dimensionamento

Os estados-limites últimos das barras de seção transversal aberta, formadas por chapas finas de aço, a serem considerados no dimensionamento, frequentemente estão associados à instabilidade local, distorcional ou global.

No cálculo convencional de estruturas de aço compostas de perfis laminados ou soldados, a instabilidade local pode ser evitada pelo uso de uma classe desses perfis, que tem uma relação largura/espessura reduzida.

Os elementos planos que constituem a seção do perfil formado a frio podem deformar-se

localmente quando solicitados à compressão axial, à compressão com flexão, ao cisalhamento etc. (ver a Figura 3.9) devido à instabilidade local. Diferentemente da instabilidade global de barra, a instabilidade local não implica necessariamente no esgotamento da capacidade portante do perfil, mas, apenas uma redução de sua rigidez global à deformação.

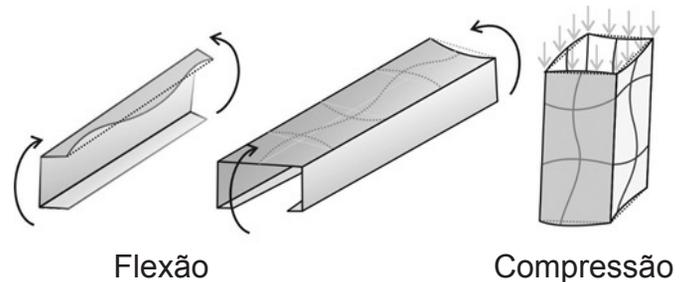


Figura 3.9 – Instabilidade local

As chapas de aço ainda possuem considerável capacidade resistente após a ocorrência da instabilidade local. Sua capacidade resistente chegará ao limite somente quando as fibras mais comprimidas atingirem a resistência ao escoamento do aço. Isso significa que o correto dimensionamento desses elementos depende de uma análise não linear. Alternativamente, podem-se empregar expressões diretas, deduzidas a partir de teorias simplificadas e calibradas empiricamente ou teorias mais avançadas. Atualmente, na norma brasileira para o dimensionamento de perfis formados a frio, ABNT NBR 14762:2010, há três procedimentos para a determinação de esforços resistentes:

MLE - Método das larguras efetivas, em que a instabilidade local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal das barras, provenientes do cálculo das larguras efetivas dos elementos totalmente ou parcialmente comprimidos, conforme o item 3.1. Adicionalmente, deve ser considerada a instabilidade distorcional, conforme os itens 6.2, para barras submetidas à compressão, e 7.3, para barras submetidas à flexão;

MSE - Método das seções efetivas, expressões deduzidas a partir do método apresentado a seguir (MRD) que permitem calcular os esforços resistentes de determinados tipos de seções transversais a partir de determinadas expressões fornecidas pela ABNT NBR 14762:2010. Para o cálculo manual é o método mais expedito;

MRD - Método de determinação direta dos esforços resistentes. A ABNT NBR 14762:2010 apresenta algumas expressões para a determinação dos esforços resistentes, no entanto, demanda o conhecimento dos valores críticos (valores mínimos) das forças axiais e momentos fletores de flambagem elástica local e distorcional, respectivamente  $N_{\ell}$  e  $N_{\text{dist}}$ ,  $M_{\ell}$  e  $M_{\text{dist}}$ . Para isso, é necessário realizar uma análise geral de estabilidade elástica, o que é feito se empregando programas de computador, tais como, CUFSM (Schafer e Ádány, 2006) e INSTAB (Pierin, 2011). A ABNT NBR 14762:2010 designa o MRD por método da resistência direta. Segundo a ABNT NBR 8681:2003, “resistência” é a aptidão da matéria de suportar tensões. As demais normas brasileiras seguem essa definição. Portanto, o termo “resistência” deve ser associado ao material e não a seções ou barras. Dessa forma, os autores optaram por designar o método MRD, de forma coerente às demais normas brasileiras, ou seja, método de determinação direta dos esforços resistentes, mantendo a sigla MRD para evitar confusões.

### 3.4 – Elementos Comprimidos com Enrijecedor de Borda

Para calcular a largura efetiva de um elemento com enrijecedor de borda é necessário considerar as dimensões do elemento ( $b$ ) e as do enrijecedor de borda ( $D$ ) (ver a Figura 3.10). Se o elemento  $b$  for pouco esbelto (valor de  $b/t$  pequeno - até cerca de 12) não haverá necessidade de enrijecedor para aumentar sua capacidade resistente à compressão e sua largura efetiva será igual à largura bruta. Para elementos esbeltos o enrijecedor de borda deverá

servir como um apoio “fixo” na extremidade do elemento. Nesse caso, a largura efetiva calculada dependerá da esbeltez do elemento ( $b/t$ ), da esbeltez do enrijecedor de borda ( $D/t$ ) e da inércia do enrijecedor de borda ( $I_s$  - momento de inércia do enrijecedor em relação ao seu centro geométrico).

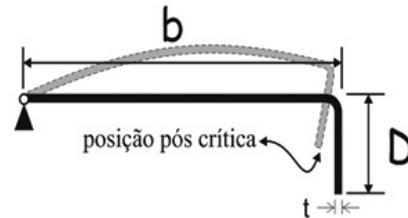


Figura 3.10 – elemento enrijecido

Além de servir como apoio, o enrijecedor, também, se comporta como um elemento de borda livre (AL) sujeito à instabilidade local. A ocorrência da instabilidade local do enrijecedor induzirá a instabilidade local na mesa enrijecida. Um enrijecedor de borda adequado é aquele que tem condições de se comportar como um apoio à mesa. Para isso, ele precisa ter uma rigidez mínima, ou seja, um momento de inércia mínimo, denominada de  $I_a$ . Se o enrijecedor for inadequado, ou seja,  $I_s < I_a$ , o comportamento da chapa da mesa será mais próximo ao de uma chapa com borda livre, portanto, o valor do coeficiente de flambem local para mesa,  $k$ , será pequeno aproximando-se ao da chapa livre. Quando as dimensões do enrijecedor não respeitam os limites de adequação, será necessário, também, reduzir a largura efetiva do enrijecedor de borda,  $d_s$ , conforme mostra a Figura 3.11, a fim de se reduzir as tensões nele aplicadas.

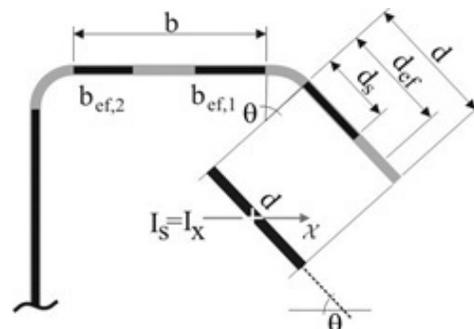


Figura 3.11 – Enrijecedor de borda

Primeiramente se calcula  $\lambda_{p0}$  por meio da equação 3.5, que é o valor da esbelteza reduzida da mesa como se ela fosse um elemento de borda livre (AL):

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,95\sqrt{\frac{0,43E}{\sigma}}} = \frac{b/t}{0,623\sqrt{\frac{E}{f_y}}} \quad (\text{eq. 3.5})$$

Conforme o valor obtido de  $\lambda_{p0}$  calcula-se o valor das larguras efetivas conforme um dos casos I e II:

Caso I –  $\lambda_{p0} \leq 0,673$  - Elemento pouco esbelto. Mesmo se a mesa fosse de borda livre (AL) sua largura efetiva seria igual a largura bruta. Nesse caso, não é necessária a previsão do enrijecedor de borda.

$$b_{ef} = b \rightarrow \text{para a mesa comprimida}$$

Caso II –  $\lambda_{p0} > 0,673$  – Elemento esbelto. Precisa ser apoiado pelo enrijecedor para aumentar sua capacidade resistente.

O cálculo da largura efetiva é feito por meio da equação 3.2, onde o coeficiente de flambagem  $k$  é calculado conforme as equações 3.6 e 3.7.

Para  $D/b \leq 0,25$

$$k = 3,57 \left( \frac{I_s}{I_a} \right)^n + 0,43 \leq 4 \quad (\text{eq. 3.6})$$

Para  $0,25 < D/b \leq 0,81$

$$k = \left( \frac{I_s}{I_a} \right)^n \left( 4,82 - 5 \frac{D}{b} \right) + 0,43 \leq 4 \quad (\text{eq. 3.7})$$

em ambos os casos, considerar  $\left( \frac{I_s}{I_a} \right) \leq 1,0$

onde,

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p0}) \geq \frac{1}{3} \quad (\text{eq. 3.8})$$

$$I_a = 399t^4 (0,487\lambda_{p0} - 0,328)^3 \leq t^4 (56\lambda_{p0} + 5) \quad (\text{eq. 3.9})$$

O momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao seu centro geométrico em torno do eixo paralelo ao elemento enrijecido é determinado conforme a equação 3.10. O ângulo  $\theta$  é mostrado na Figura 3.11.

$$I_s = \frac{d^3 t \cdot \text{sen}^2 \theta}{12} \quad (\text{eq. 3.10})$$

A largura do enrijecedor de borda a ser utilizada na obtenção das propriedades geométricas da seção transversal deve ser reduzida para o valor  $d_s$ , apresentada na equação 3.11, na qual é considerada a perda de rigidez desse elemento devido à sua ação como apoio do elemento da mesa.

$$d_s = \frac{I_s}{I_a} d_{ef} \leq d_{ef} \quad (\text{eq. 3.11})$$

em que

$I_a$  – momento de inércia de referência do enrijecedor de borda

$D$  – dimensão nominal do enrijecedor de borda (Figura 3.11)

$d_{ef}$  – largura efetiva do enrijecedor de borda, calculada por meio da equação 3.2 e considerando-o como um elemento AL, com o coeficiente  $k$  calculado conforme a Tabela 3.3.

$d_s$  – largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda.

$\theta$  - ângulo formado pelo elemento e enrijecedor de borda, sendo  $40^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$

Com o valor de  $k$  obtido da equação 3.6 ou 3.7, obtém-se a largura efetiva por meio da equação 3.2, já apresentada, que aqui se repete.

$$b_{ef} = \frac{b \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \quad (\text{eq. 3.2})$$

sendo,

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}} \quad (\text{eq. 3.3})$$

A tensão  $\sigma$  é a mesma que foi definida no item 3.2.3

A largura efetiva do elemento é dividida em dois trechos próximos às extremidades do elemento, o primeiro trecho de comprimento  $b_{\text{ef},2}$ , no lado da alma do perfil e o segundo trecho  $b_{\text{ef},1}$ , no lado do enrijecedor de borda, esses valores são obtidos por meio das equações 3.12 e 3.13.

$$b_{\text{ef},1} = \frac{I_s}{I_a} \left( \frac{b_{\text{ef}}}{2} \right) \leq \frac{b_{\text{ef}}}{2} \quad (\text{eq. 3.12})$$

$$b_{\text{ef},2} = b_{\text{ef}} - b_{\text{ef},1} \quad (\text{eq. 3.13})$$



# ***Capítulo 4***

---

## Fenômenos de Instabilidades Global e Distorcional

## Fenômenos de instabilidades global e distorcional

Barras comprimidas estão sujeitas à instabilidade por flexão, à instabilidade por torção ou à instabilidade por flexotorção. Essas denominações devem-se às formas da deformação pós-crítica, como se pode ver na Figura 4.1

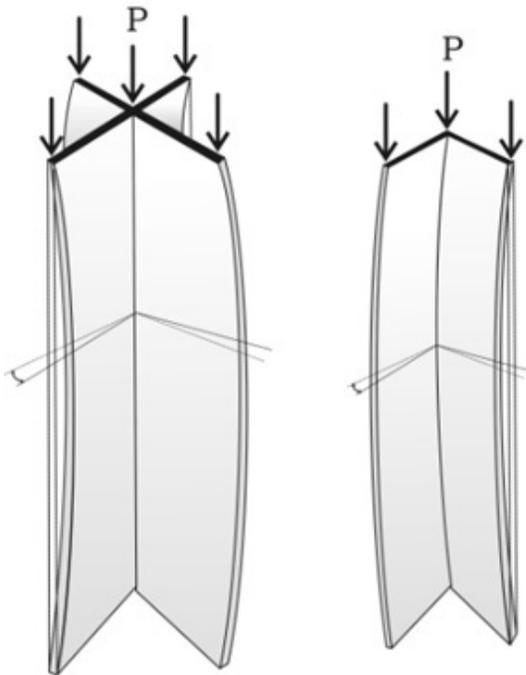


Figura 4.1 - Instabilidade a) por torção / b) por flexotorção (Silva e Pannoni, 2010)

O aumento da esbeltez da barra diminui sua capacidade para resistir aos esforços solicitantes. Isso significa que a máxima tensão que poderá atuar num elemento de chapa será a tensão crítica de flambagem global elástica e não mais a resistência ao escoamento do aço,  $\sigma_e = \sigma_{crit}$ . As larguras efetivas dos elementos da seção são, portanto, calculadas para esse valor de tensão.

Em peças excessivamente esbeltas, a tensão crítica de flambagem global é muito pequena, sendo menor que a flambagem local, não havendo redução das larguras efetivas, a seção efetiva é a própria seção bruta. Nesses casos, é a instabilidade global que determina o esforço resistente do perfil.

Em peças curtas, as forças críticas da flambagem global são altíssimas e o esforço resistente do perfil é determinado pela instabilidade local considerando-se a resistência do material (aço).

Para uma faixa de esbeltez intermediária da barra, não excessivamente esbelta ou curta, pode ocorrer a instabilidade por distorção. A ocorrência desse fenômeno ocorre em perfis com seções enrijecidas, que estão travados contra o deslocamento lateral ou por torção.

Por meio do programa INSTAB (Pierin, 2011) é possível verificar a variação do coeficiente de flambagem local ( $k_f$ ) e a natureza do modo de flambagem em função do comprimento do perfil. A título de exemplo, a Figura 4.2 mostra a variação do coeficiente de flambagem em função do parâmetro geométrico  $L/b_w$  (relação entre o comprimento do perfil e a largura da alma) de um perfil de seção Ue  $100 \times 50 \times 17 \times 3,35$  submetido à compressão centrada e simplesmente apoiado.

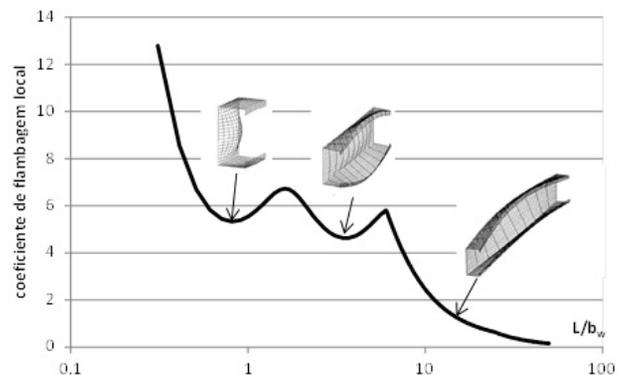


Figura 4.2 - Variação do coeficiente de flambagem  $k_f$  em função da relação entre o comprimento do perfil e a largura da alma. (Adaptada de Pierin *et al*, 2013).

Observa-se a curva que representa a variação do coeficiente de flambagem em função do comprimento do perfil apresenta dois pontos de mínimos locais. O primeiro está associado ao valor da força crítica que provoca a flambagem local (modo local de chapa – MLC) e o segundo ponto de mínimo está associado ao valor da força crítica que provoca a flambagem distorcional (MD) no perfil (Prola, 2001).

O ramo descendente da curva, que ocorre para comprimentos maiores, está associado ao modo global de flambagem que pode ser por flexão (MGF), por torção (MGT) ou flexotorção (MGFT). A natureza do modo de flambagem global depende da geometria da seção transversal e do comprimento do perfil.

A capacidade resistente dos perfis de aço formados a frio pode ser melhorada com a utilização de seções transversais enrijecidas, porém, o comportamento estrutural do perfil é alterado. Em perfis com seção transversal sem enrijecedores de borda os modos de flambagem se resumem ao local e ao global. Perfis com seções enrijecidas podem apresentar o modo distorcional. Dependendo da geometria da seção transversal o modo distorcional pode governar o dimensionamento do perfil de aço formado a frio, pois a força crítica associada ao modo distorcional pode ser inferior à força crítica que provoca a flambagem local.

No dimensionamento de peças submetidas à compressão ou a momento fletor, o esforço resistente da peça é calculado considerando-se as eventuais instabilidades global e local e, de forma independente, verifica-se o efeito da instabilidade distorcional da seção transversal. O menor valor encontrado é o esforço resistente da peça.

Nos casos em que a instabilidade por distorção na seção transversal não corresponde ao efeito mais desfavorável para o cálculo do esforço resistente significa que a geometria da seção transversal favorece a ocorrência da instabilidade local ou global antes de ocorrer a distorção, como mostra a Figura 4.3. Nesse exemplo conceitual mostra-se como a análise da força crítica é realizada com todas as quantidades de semiondas que são possíveis obterem a posição deslocada (e equilibrada) dos elementos de chapas na configuração pós-crítica. O comprimento da peça na qual se identifica a ocorrência da distorção da seção transversal é chamado de  $L_d$ .

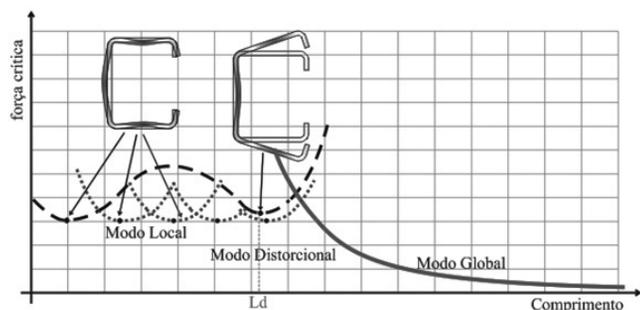


Figura 4.3 – Valor da força crítica em relação ao comprimento da peça.

A instabilidade por distorção é caracterizada pela alteração da forma inicial da seção transversal ocorrendo uma rotação dos elementos submetidos à compressão.

Esse fenômeno torna-se mais evidente em:

- aços de alta resistência
- elementos com menor largura do enrijecedor de borda,
- perfis mais espessos,
- seção cujos elementos são pouco esbeltos (menor relação  $b/t$ ). Nesse caso, o efeito da instabilidade distorcional pode ser menor do que a da local.

Uma característica que diferencia a instabilidade local da distorcional é a deformação pós-crítica. Na distorção, a seção perde sua forma inicial (Figuras 4.4b e 4.5), o que não ocorre na instabilidade local (Figura 4.4a).

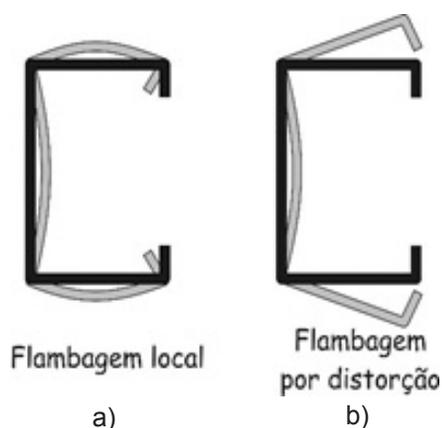


Figura 4.4 – Instabilidade local e distorcional

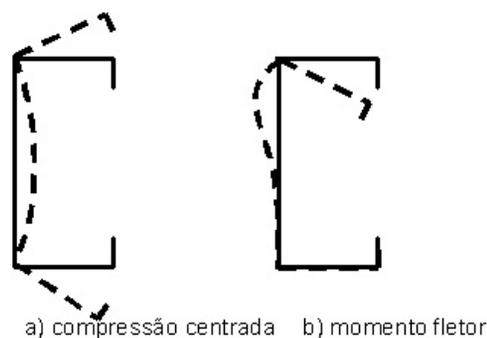


Figura 4.5 – Distorção da seção transversal

AABNT NBR 14762:2010 não detalha um procedimento completo para a determinação do esforço resistente de uma barra considerando-se a instabilidade distorcional. Ou fornece um

## Fenômenos de instabilidades global e distorcional

método analítico, mas remete à determinação da força ou momento crítico, a uma análise de estabilidade elástica ou permite que se empregue o MRD - Método de determinação direta dos esforços resistentes. Em ambos os casos, é necessário o uso de programas de computador via elementos finitos ou faixas finitas. Pierin *et al* (2013) apresentam uma tabela de valores de esforços críticos que permitem usar os métodos analíticos apresentados na norma brasileira. Esses valores foram determinados por meio do programa INSTAB, desenvolvido em Pierin (2011), que serviu de referência ao DimPerfil 4.0 no que se refere à verificação da instabilidade distorcional.

Ao se usar programas comerciais de dimensionamento para calcular os esforços resistentes dos perfis formados a frio, deve-se verificar se os mesmos incluem a verificação da instabilidade distorcional.

O único caso em que a norma dispensa a verificação à distorção é para as seções transversais que apresentam as relações entre seus elementos (mesa, alma, enrijecedor de borda e espessura) conforme descritas nas Tabelas 11 e 14 da ABNT NBR 14762:2010 que estão copiadas nas Tabelas 4.1 e 4.2 a seguir.

Tabela 4.1 - Valores mínimos da relação  $D/b_w$  de barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido submetidas à compressão centrada, para dispensar a verificação da instabilidade distorcional.

$b_f/b_w$	$b_w/t$				
	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,1	0,22
1	0,06	0,07	0,1	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

(Para valores intermediários, interpolar linearmente)

Tabela 4.2 - Valores mínimos da relação  $D/b_w$  de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da instabilidade distorcional.

$b_f/b_w$	$b_w/t$				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,1	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,1	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,2
1,4	0,05	0,06	0,09	0,1	0,2
1,6	0,05	0,06	0,09	0,1	0,2
1,8	0,05	0,06	0,09	0,1	0,19
2	0,05	0,06	0,09	0,1	0,19

onde  $b_f$ ,  $b_w$ , e  $D$  são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 2.3. Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Utilizando-se os critérios das Tabelas 4.1 e 4.2, apresenta-se na Tabela 4.3 a lista de perfis tabelados na ABNT NBR 6355:2012 que não necessitam de verificação à distorção para o dimensionamento à compressão e, na Tabela 4.4, para o dimensionamento ao momento fletor em relação ao eixo de maior inércia.

Tabela 4.3 – Perfis que dispensam verificação da distorção para o cálculo da força axial resistente, conforme ABNT NBR 14762:2010

PERFIL	$b_f/b_w$	$b_w/t$	$D/b_w$	$D/b_w \text{ min}$
Ue 75x40x15x1.5	0.53	50.00	0.20	0.13
Ue 100x40x17x1.2	0.40	83.33	0.17	0.05
Ue 100x40x17x1.5	0.40	66.67	0.17	0.07
Ue 100x40x17x2	0.40	50.00	0.17	0.08
Ue 100x50x17x1.2	0.50	83.33	0.17	0.07
Ue 100x50x17x1.5	0.50	66.67	0.17	0.09
Ue 100x50x17x2	0.50	50.00	0.17	0.12
Ue 125x50x17x2	0.40	62.50	0.14	0.07
Ue 125x50x17x2.25	0.40	55.56	0.14	0.08
Ue 150x60x20x2	0.40	75.00	0.13	0.06
Ue 150x60x20x2.25	0.40	66.67	0.13	0.07
Ue 150x60x20x2.65	0.40	56.60	0.13	0.07
Ue 150x60x20x3	0.40	50.00	0.13	0.08
Ue 200x100x25x2.65	0.50	75.47	0.13	0.08
Ue 200x100x25x3	0.50	66.67	0.13	0.09
Ue 200x100x25x3.35	0.50	59.70	0.13	0.10
Ue 200x100x25x3.75	0.50	53.33	0.13	0.11
Ue 250x100x25x2.65	0.40	94.34	0.10	0.04
Ue 250x100x25x3	0.40	83.33	0.10	0.05
Ue 250x100x25x3.35	0.40	74.63	0.10	0.06
Ue 250x100x25x3.75	0.40	66.67	0.10	0.07
Ue 250x100x25x4.25	0.40	58.82	0.10	0.07
Ue 250x100x25x4.75	0.40	52.63	0.10	0.08
Z <sub>90</sub> 75x40x15x1.2	0.53	62.50	0.20	0.11
Z <sub>90</sub> 75x40x15x1.5	0.53	50.00	0.20	0.13
Z <sub>90</sub> 100x50x17x1.2	0.50	83.33	0.17	0.07
Z <sub>90</sub> 100x50x17x1.5	0.50	66.67	0.17	0.09
Z <sub>90</sub> 100x50x17x2	0.50	50.00	0.17	0.12
Z <sub>90</sub> 125x50x17x2	0.40	62.50	0.14	0.07
Z <sub>90</sub> 125x50x17x2.25	0.40	55.56	0.14	0.08
Z <sub>90</sub> 150x60x20x2	0.40	75.00	0.13	0.06
Z <sub>90</sub> 150x60x20x2.25	0.40	66.67	0.13	0.07
Z <sub>90</sub> 150x60x20x2.65	0.40	56.60	0.13	0.07
Z <sub>90</sub> 150x60x20x3	0.40	50.00	0.13	0.08

Tabela 4.4 – Perfis que dispensam verificação da distorção para o cálculo de momento fletor resistente em relação ao eixo de maior inércia, conforme ABNT NBR 14762:2010

PERFIL	$b_f/b_w$	$b_w/t$	$D/b_w$	$D/b_w \text{ min}$
Ue 100x40x17x1.2	0.40	83.33	0.17	0.16
Ue 100x50x17x1.2	0.50	83.33	0.17	0.16
Z <sub>90</sub> 100x50x17x1.2	0.50	83.33	0.17	0.16



# ***Capítulo 5***

---

## Dimensionamiento de Barras Traccionadas

## Dimensionamento de barras tracionadas

O dimensionamento de perfis formados a frio normatizado pela ABNT NBR 14762:2010 se aplica a barras de seção constante submetidas a ações estáticas.

No dimensionamento à tração dos perfis formados a frio são necessárias duas verificações: a primeira, denominada *verificação ao escoamento da seção bruta*, corresponde verificar se, ao longo da barra, a força resistente, considerando-se a resistência ao escoamento, é maior do que a solicitante. A segunda verificação, denominada de *verificação da capacidade última da seção efetiva*, é feita na região das ligações, onde pode haver furos para passagem dos parafusos, que reduzem a área tracionada. Deve-se realizar, também, a *verificação da capacidade última da seção efetiva* na região fora das ligações, ou seja, em regiões em que haja furos ou recortes que não estejam associados à ligação da barra. Em grande parte das situações, a aplicação da força de tração é excêntrica em relação à região conectada. Essa excentricidade conduz a um aumento dos esforços aplicados ao perfil. Para se considerar esse aumento, diminui-se o valor da força de tração resistente por meio de um coeficiente  $C_t$ . O valor do coeficiente  $C_t$  é obtido empiricamente e a ABNT NBR 14762:2010 apresenta tabelas para sua obtenção. A *verificação da capacidade última da seção efetiva* é feita com a resistência última de ruptura à tração do aço,  $f_u$ , pois, devido à pequena dimensão da região da ligação, se permite a plastificação na seção.

As peças tracionadas não devem ter índice de esbeltez superior a 300, conforme mostra a equação 5.1.

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300 \quad (\text{eq. 5.1})$$

onde  $r$  é o raio de giração e  $L$  é o comprimento da barra.

O valor da força axial de tração resistente de cálculo,  $N_{t,Rd}$ , deve ser tomado como o menor valor entre as equações 5.2, 5.3 e 5.4.

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,1 \quad (\text{eq. 5.2})$$

$$N_{t,Rd} = A_{n0} f_u / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,35 \quad (\text{eq. 5.3})$$

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,65 \quad (\text{eq. 5.4})$$

em que  $A$  é a área bruta da seção transversal da barra,  $A_{n0}$  é a área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação como, por exemplo, decorrentes de furos ou recortes que não estejam associados à ligação da barra e  $A_n$  é a área líquida da seção transversal da barra, que para as chapas com ligação parafusadas é dada pela equação 5.5,

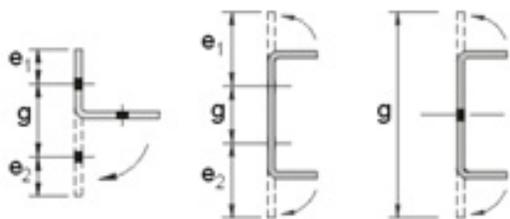
$$A_n = 0,9 (A - n_f d_f t + \sum t s^2 / 4g) \quad (\text{eq. 5.5})$$

onde  $d_f$  é a dimensão do furo,  $t$  é a espessura da parte conectada analisada,  $n_f$  é a quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada (ver a Figura 5.1),  $s$  e  $g$  são os espaçamentos dos furos na direção paralela e perpendicular da solicitação, respectivamente, conforme mostra a Figura 5.1 e  $C_t$  é o coeficiente de redução de área líquida conforme item 9.6.2 da ABNT NBR 14762:2010 mostrados nas tabelas 5.1 a 5.3.

Para ligações soldadas, considerar  $A_n = A$ . Nos casos em que houver apenas soldas transversais (soldas de topo),  $A_n$  deve ser considerada igual à área bruta da(s) parte(s) conectada(s) apenas.



Figura 5.1a – Linha de ruptura



Perfis tratados como chapa ( todos os parafusos contidos em uma única seção )

Figura 5.1b – Linha de ruptura

Tabela 5.1 - Chapas com ligações parafusadas

Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal	$C_t = 2,5(d/g) \leq 1,0$
Dois parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zig-zag	$C_t = 0,5 + 1,25(d/g) \leq 1,0$
Três parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zig-zag	$C_t = 0,67 + 0,83(d/g) \leq 1,0$
Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue-zague	$C_t = 0,75 + 0,625(d/g) \leq 1,0$

onde d é o diâmetro nominal do parafuso.

Em casos de espaçamentos diferentes, tomar sempre o maior valor de g para cálculo de  $C_t$ .

Nos casos em que o espaçamento entre furos g for inferior à soma das distâncias entre os centros dos furos de extremidade às respectivas bordas, na direção perpendicular à solicitação ( $e_1 + e_2$ ),  $C_t$  deve ser calculado substituindo g por  $e_1 + e_2$ .

Havendo um único parafuso na seção analisada,  $C_t$  deve ser calculado tomando-se g como a própria largura bruta da chapa.

Nos casos de furos com disposição em zigue-zague, com g inferior a 3d,  $C_t$  deve ser calculado tomando-se g igual ao maior valor entre 3d e a soma  $e_1 + e_2$ .

Tabela 5.2 – Chapas com ligações soldadas

Soldas longitudinais associadas a soldas transversais	$C_t = 1,0$
Somente soldas longitudinais ao longo de ambas as bordas	para $b \leq L < 1,5b$ : $C_t = 0,75$
	para $1,5b \leq L < 2b$ : $C_t = 0,87$
	para $L \geq 2b$ : $C_t = 1,0$

Tabela 5.3 - Perfis com ligações soldadas

Todos os elementos conectados	$C_t = 1,0$
Cantoneiras com soldas longitudinais (Figura 5.3)	$C_t = 1 - 1,2(x/L) < 0,9$ (porém, não inferior a 0,4)
Perfis U com soldas longitudinais (Figura 5.3)	$C_t = 1 - 0,36(x/L) < 0,9$ (porém, não inferior a 0,5)

Tabela 5.4 - Perfis com ligações parafusadas

Todos os elementos conectados	$C_t = 1,0$
Cantoneiras e perfis U com 2 ou mais parafusos na direção da solicitação.	$C_t = 1 - 1,2(x/L) < 0,9$ (porém, não inferior a 0,4)
Todos os parafusos contidos em uma única seção transversal.	$C_t = 2,5(d/g) = 1,0$

onde b é a largura da chapa, L é o comprimento da ligação parafusada ou o comprimento da solda e x é a excentricidade da ligação, tomada como a distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil, conforme mostram as Figuras 5.2 e 5.3.

## Dimensionamento de barras tracionadas

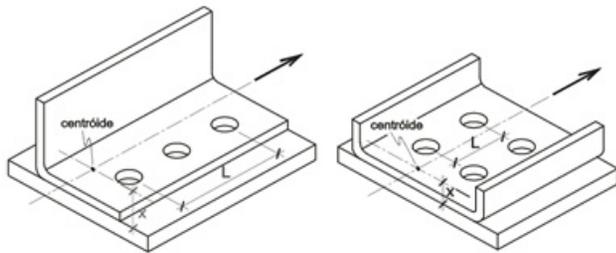


Figura 5.2 – Ligações parafusadas

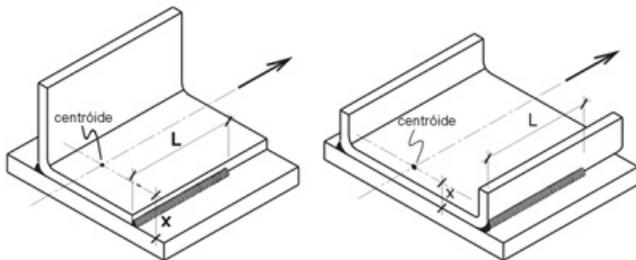
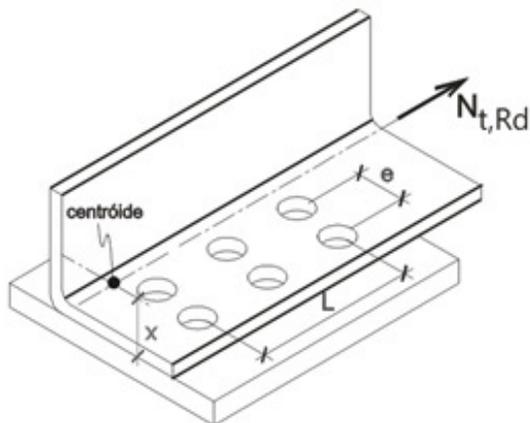


Figura 5.3 – Ligações soldadas

**Exemplo 01** – Calcular a força de tração resistente ( $N_{t,Rd}$ ) do perfil L125×6,3, com ligação na extremidade conforme a Figura 5.2, considerando-se o uso de parafusos de 16 mm espaçados em  $L = 100$  mm,  $e = 40$  mm.



$$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2 \quad E = 20000 \text{ kN/cm}^2$$

$$G = 7692,31 \text{ kN/cm}^2$$

a) Cálculo para o escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,1$$

$$A = 15,1 \text{ cm}^2 \quad f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$$

$$\gamma = 1,1 \quad N_{t,Rd} = 329,4 \text{ kN}$$

b) Cálculo para ruptura na seção líquida na região da ligação:

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,65$$

$$A_n = 0,9 [15,1 - 2x (1,6 + 0,15)] = 10,4 \text{ cm}^2$$

$$C_t = 1,0 - 1,2 (X/L) \leq 1,0 \rightarrow C_t = 0,5$$

$X = 4,19$  cm – posição do centro geométrico em relação a face do perfil

$L = 10$  cm - comprimento da ligação

$$f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$$

$$\gamma = 1,65$$

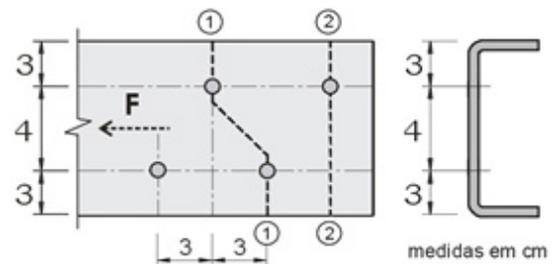
$$N_{t,Rd} = 126,1 \text{ kN}$$

O esforço resistente à tração é o menor valor calculado acima:

$$N_{t,Rd} = 126,1 \text{ kN}$$

**Exemplo 02** - Cálculo da força normal resistente à tração de um tirante L 100×40×2,0 de 3,5 m de comprimento, com a ligação feita por meio de 4 parafusos com diâmetro de 12,5 mm na alma conforme dispostos na figura abaixo: Adotar aço  $f_y = 25$  kN/cm<sup>2</sup> e  $f_u = 40$  kN/cm<sup>2</sup>

1) Verificação ao escoamento da seção bruta:



$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma$$

$$A = 3,468 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 25,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\gamma = 1,1$$

$$N_{t,Rd} = 3,468 \cdot 25,0 / 1,1 = 78,82 \text{ kN}$$

2) Verificação da ruptura da seção efetiva:

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u / \gamma$$

$$\gamma = 1,35$$

$$A_n = 0,9(A - n_f d_f t + \sum t s^2 / 4g)$$

$$n_f = 2$$

$$d_f = 1,25 + 0,15 \text{ cm}$$

$$s = 3 \text{ cm}$$

$$g = 4 \text{ cm}$$

$$A_n = 0,9 \left( 3,468 - 2 \cdot (1,25 + 0,15) \cdot 0,2 + \frac{0,2 \cdot 3^2}{4 \cdot 4} \right) = 2,72 \text{ cm}^2$$

$C_t$  – Tabela 5.1 – perfis com ligações parafusadas: Perfis U com dois ou mais parafusos na direção da solicitação

$C_t = 1 - 0,36(x/L) < 0,9$  (porém, não inferior a 0,5)

$L = 3+3+3 = 9 \text{ cm}$      $x = 0,98 \text{ cm}$  (coordenada do centro geométrico)

$$C_t = 1 - 0,36(0,98 / 9) = 0,96$$

$$N_{t,Rd} = 0,96 \cdot 2,72 \cdot 40 / 1,35 = 77,36 \text{ kN}$$

$N_{t,Rd}$  é o menor valor calculado:

$$N_{t,Rd} = 77,36 \text{ kN}$$

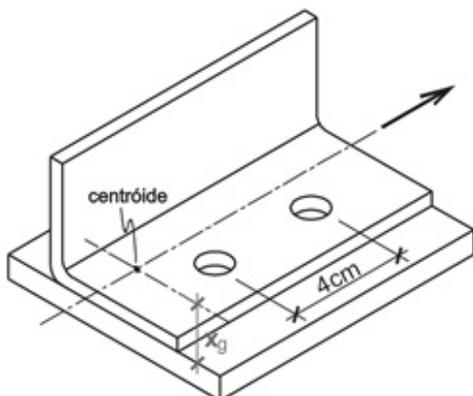
Verificação da esbelteza da barra:

$$r_{\min} = r_y = 1,23$$

$$\lambda = \frac{L}{r} = \frac{350}{1,23} = 285 \leq 300 \quad \text{ok!}$$

**Exemplo 03** - Cálculo da força resistente à tração de um tirante L 100×4,75 de 5,0 m de comprimento, com a ligação feita com 2 parafusos com diâmetro de 16 mm conforme dispostos na figura abaixo: Adotar aço  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$  e  $f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$

$$(r_{\min} = 1,95 \text{ cm})$$



1) Verificação ao escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma$$

$$A = 9,129 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 25,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\gamma = 1,1$$

$$N_{t,Rd} = 9,129 \cdot 25,0 / 1,1$$

$$N_{t,Rd} = 207,47 \text{ kN}$$

2) Verificação da ruptura da seção efetiva:

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u / \gamma$$

$$\gamma = 1,35$$

$$A_n = 0,9(A - n_f d_f t + \sum t s^2 / 4g)$$

$$n_f = 1$$

$$d_f = 1,6 + 0,15 \text{ cm}$$

$$s = 0 \text{ cm}$$

$$A_n = 7,47 \text{ cm}^2$$

$C_t$  – tabela 5.2 – perfis com ligações parafusadas: Perfis L com dois ou mais parafusos na direção da solicitação

$C_t = 1 - 1,2(x/L) < 0,9$  (porém, não inferior a 0,4)

$L = 4 \text{ cm}$      $x = 2,48 \text{ cm}$  (coordenada do centro geométrico)

$$C_t = 1 - 1,2(2,48 / 4) = 0,25 \rightarrow C_t = 0,4$$

$$N_{t,Rd} = 0,4 \cdot 7,47 \cdot 40 / 1,35 = 88,53 \text{ kN}$$

$N_{t,Rd}$  é o menor valor calculado:

$$N_{t,Rd} = 88,53 \text{ kN}$$

Verificação da esbelteza da barra:

$$r_{\min} = 1,95$$

$$\lambda = \frac{L}{r} = \frac{500}{1,95} = 256 \leq 300 \quad \text{ok!}$$



# ***Capítulo 6***

---

## Dimensionamento de Barras Comprimidas

## Dimensionamento de barras comprimidas

Antes de adotar os valores das dimensões dos perfis a serem utilizadas no projeto é necessário estar atento aos limites geométricos impostos pela norma, em especial as relações largura/espessuras máximas que constam no item 9.1.2 da ABNT NBR 14762:2010.

Apresentam-se na Tabela 6.1 alguns dos limites impostos pela norma quanto aos valores máximos da relação largura-espessura:

Tabela 6.1 - Valores máximos da relação largura-espessura para elementos comprimidos

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura <sup>1)</sup>
Mesas enrijecida ( $b_f$ ) com enrijecedor de borda simples.	$(b/t)_{\max} = 60$ <sup>2)</sup>
Mesas enrijecidas ( $b_f$ ) com enrijecedor tendo $I_s \geq I_a$ .	$(b/t)_{\max} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\max} = 90$
Elemento com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\max} = 500$ <sup>3)</sup>
Elemento AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$ .	$(b/t)_{\max} = 60$ <sup>2)</sup>
Alma de vigas sem enrijecedores transversais.	$(b/t)_{\max} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios.	$(b/t)_{\max} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários.	$(b/t)_{\max} = 300$
<sup>1)</sup> $b_f$ e $b_w$ são as larguras do elemento; $t$ é a espessura. <sup>2)</sup> Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 30$ . <sup>3)</sup> Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 250$ .	

Segundo a ABNT NBR 14762:2010, a força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , deve ser tomada como o menor valor calculado entre:

1 – Força axial resistente de cálculo devido à instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção.

2 - Força axial resistente de cálculo devido à instabilidade por distorção da seção transversal.

As peças tracionadas não devem ter índice de esbeltez superior a 200, conforme mostra a equação 6.1.

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 200 \quad (\text{eq. 6.1})$$

onde  $r$  é o raio de giração e  $L$  é o comprimento da barra

### 6.1 – Força Axial Resistente de Cálculo Devido à Instabilidade da Barra por Flexão, por Torção ou por Flexotorção.

A força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , deve ser determinada por meio da equação 6.2.

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,2 \quad (\text{eq. 6.2})$$

onde  $\chi$  é o fator de redução decorrente da instabilidade global calculado pela equação 6.3 ou obtido da Tabela 6.2.

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (\text{eq. 6.3})$$

em que  $\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade global dado pela equação 6.4.

$$\lambda_0 = \left( \frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (\text{eq. 6.4})$$

onde  $A$  é a área bruta da seção transversal da barra e  $A_{ef}$  é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, adotando  $\sigma = \chi f_y$ .

A força axial crítica de flambagem elástica da barra ( $N_e$ ) é calculado conforme os itens 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3.

Tabela 6.2 - Valores de  $\chi$  em função do índice de esbeltez reduzido  $\lambda_0$   
(extraído da tabela 8 da ABNT NBR 14762:2010)

$\lambda_0$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	$\lambda_0$
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

## Dimensionamento de barras comprimidas

6.1.1 - Cálculo de  $N_e$  em perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto

A força axial crítica de flambagem elástica  $N_e$  é o menor valor obtido por meio das equações 6.5, 6.6 e 6.7:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{eq. 6.5})$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{eq. 6.6})$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E I_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] \quad (\text{eq. 6.7})$$

em que  $I_w$  é o momento de inércia ao empenamento da seção,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $G$  é o módulo de elasticidade transversal,  $I_t$  é o momento de inércia à torção uniforme,  $K_x L_x$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo  $x$ ,  $K_y L_y$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo  $y$ ,  $K_z L_z$  é o comprimento de flambagem por torção. Quando não houver garantia de impedimento ao empenamento, deve-se tomar  $K_z$  igual a 1,0. O raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção,  $r_0$ , é dado pela equação 6.8,

$$r_0 = \left[ r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2 \right]^{0,5} \quad (\text{eq. 6.8})$$

onde  $r_x$  e  $r_y$  são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia  $x$  e  $y$ , respectivamente e  $x_0$  e  $y_0$  são as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais  $x$  e  $y$ , respectivamente, em relação ao centróide da seção.

6.1.2 - Cálculo de  $N_e$  em perfis monossimétricos

A força axial crítica de flambagem elástica  $N_e$  de um perfil com seção monossimétrica, cujo eixo  $x$  é o eixo de simetria, é o menor valor calculado por meio das equações 6.9 e 6.10:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{eq. 6.9})$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex} N_{ez} [1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{eq. 6.10})$$

Caso o eixo  $y$  seja o eixo de simetria, basta substituir  $y$  por  $x$  e  $x_0$  por  $y_0$

6.1.3 - Cálculo de  $N_e$  em perfis assimétricos

A força axial crítica de flambagem elástica  $N_e$  de um perfil com seção assimétrica é dada pela menor das raízes da equação 6.11:

$$r_0^2 (N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{ez}) - N_e^2 (N_e - N_{ey}) x_0^2 - N_e^2 (N_e - N_{ex}) y_0^2 = 0 \quad (\text{eq. 6.11})$$

onde  $N_{ex}$ ;  $N_{ey}$ ;  $N_{ez}$ ;  $x_0$ ;  $y_0$  e  $r_0$  foram definidos pelas equações 6.5 a 6.8.

### 6.2 – Força Axial Resistente de Cálculo Devido à Instabilidade Distorcional da Barra.

Para barras com seção transversal sujeitas a instabilidade distorcional, a força axial de compressão resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$  deve ser calculada pela equação 6.12:

$$N_{c,Rd} = \chi_{dist} A f_y / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,2 \quad (\text{eq. 6.12})$$

onde  $\chi_{dist}$  é o fator de redução da força axial de compressão devido à instabilidade distorcional calculado pela equação 6.13.

$$\chi_{dist} = 1,0 \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

$$\chi_{dist} = \left( 1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) \frac{1}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,561$$

(eq. 6.13)

em que  $\lambda_{\text{dist}}$  é o índice de esbeltez distorcional reduzido dado pela equação 6.14,

$$\lambda_{\text{dist}} = \left( \frac{A f_y}{N_{\text{dist}}} \right)^{0,5} \quad (\text{eq. 6.14})$$

e  $N_{\text{dist}}$  é a força axial crítica de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica. O programa DimPerfil 4.0 fornece o valor de  $N_{\text{dist}}$  automaticamente para todos os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012.

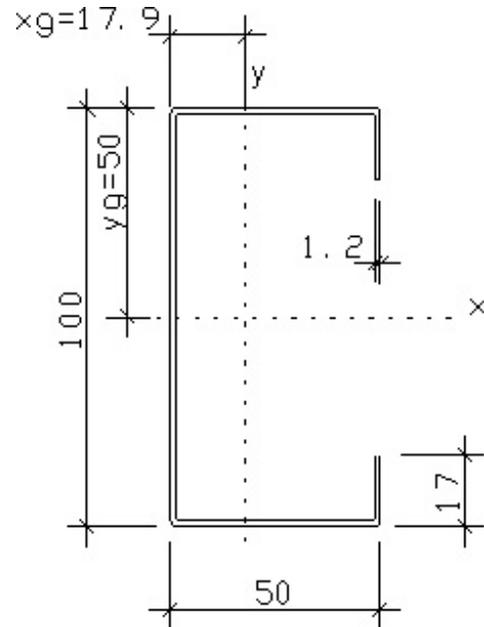
A verificação da instabilidade por distorção é um procedimento complexo de ser realizado analiticamente. Assim, para as barras com seções U enrijecidas e seções Z enrijecidas, a Tabela 4.1, retirada da ABNT NBR 14762:2010, fornece o tamanho mínimo do enrijecedor de borda em relação à dimensão da alma,  $D/b_w$ , para se dispensar a verificação da instabilidade por distorção.

Para barras com enrijecedores de borda menores ao indicado na Tabela 4.1 ou com seções diferentes de U enrijecidas e Z enrijecidas, a instabilidade por distorção deve ser verificada com o auxílio de programas computacionais específicos para esse fim. O programa DimPerfil 4.0 faz essa verificação para todos os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012.

Exemplos de cálculo de pilares submetidos à compressão:

**Exemplo 04** - Cálculo da força resistente à compressão de um pilar de seção do tipo Ue  $100 \times 50 \times 17 \times 1,2$  mm e comprimento de 4,0 m. Sem travamentos intermediários ( $k_x = k_y = k_z = 1,0$ ):

Características geométricas do perfil Ue  $100 \times 50 \times 17 \times 1,2$  mm segundo a ABNT NBR 6355:2012



$$\begin{aligned} A &= 2,71 \text{ cm}^2 & I_x &= 44,15 \text{ cm}^4 & I_y &= 10,12 \text{ cm}^4 \\ W_x &= 8,83 \text{ cm}^3 & W_y &= 3,15 \text{ cm}^3 \\ r_x &= 4,03 \text{ cm} & r_y &= 1,93 \text{ cm} \\ I_t &= 0,013 \text{ cm}^4 & x_0 &= 4,28 \text{ cm} \\ I_w &= 246,61 \text{ cm}^6 \\ r_0 &= 6,19 \text{ cm} \\ r_i &= t = 1,2 \text{ mm} \\ f_y &= 25 \text{ kN/cm}^2 \\ E &= 20000 \text{ kN/cm}^2 \\ G &= 7700 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 – item 9.7]

1 - Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

1.1 - Cálculo  $N_e$  [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

$$N_{\text{ex}} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 20000 \cdot 44,15}{(400)^2} = 54,47 \text{ kN}$$

$$N_{\text{ey}} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 20000 \cdot 10,12}{(400)^2} = 12,49 \text{ kN}$$

## Dimensionamento de barras comprimidas

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E I_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] =$$

$$= \frac{1}{6,19^2} \left[ \frac{\pi^2 20000 \cdot 246,61}{(400)^2} + 7700 \cdot 0,013 \right] = 10,55 \text{ kN}$$

Perfil monossimétrico em relação ao eixo X [ABNT NBR14762:2010 - 9.7.2.2]

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$N_{exz} = \frac{54,47 + 10,55}{2[1 - (4,28 / 6,19)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 54,47 \cdot 10,55 [1 - (4,28 / 6,19)^2]}{(54,47 + 10,55)^2}} \right] =$$

= 9,57 kN

$N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{exz}$ :

$N_e = 9,57 \text{ kN}$

modo de flambagem global: flexotorção

- Índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global

$$\lambda_0 = \left( \frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left( \frac{2,71 \cdot 2500}{957} \right)^{0,5} = 2,660$$

Como  $\lambda_0 > 1,5$ , o fator de redução é dado por:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

ou pela tabela 5.2. Assim, tem-se que  $\chi = 0,124$ .

Cálculo da área efetiva na tensão

$$\sigma = \chi \cdot f_y = 0,124 \cdot 250 = 31 \text{ MPa} = 3,1 \text{ kN / cm}^2$$

- Enrijecedor de borda – elemento com borda livre AL –  $k=0,43$

$$b = D - t - r_i = 17 - 1,2 - 1,2 = 14,6 \text{ mm}$$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma)^{0,5}} = \frac{14,6/1,2}{0,95(0,43 \cdot 20000 / 4,05)^{0,5}} =$$

$$= 0,243 < 0,673$$

Logo  $b_{ef1} = b = 14,6 \text{ mm}$

- Mesa – elemento com enrijecedor de borda –  $b = b_w - 2t - 2r_i = 50 - 2 \cdot 1,2 - 2 \cdot 1,2 = 45,2 \text{ mm}$

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623(E / \sigma)^{0,5}} = \frac{45,2/1,2}{0,623(20000 / 3,1)^{0,5}} =$$

$$= 0,753 > 0,673$$

Assim, deve-se calcular um coeficiente de instabilidade que leve em conta a contribuição do enrijecedor de borda.

Momento de inércia do enrijecedor

$$I_s = (td^3 \sin^2 \theta) / 12 = (0,12 \cdot 1,46^3 \sin^2 90) / 12 = 0,03 \text{ cm}^4$$

Momento de inércia de referência do enrijecedor

$$I_a = 399t^4 [0,487\lambda_{p0} - 0,328]^3 \leq t^4 [56\lambda_{p0} + 5]$$

$$I_a = 399 \cdot 0,12^4 [0,487 \cdot 0,753 - 0,328]^3 \leq 0,12^4 [56 \cdot 0,753 + 5]$$

$$I_a = 4,8 \cdot 10^{-6} \leq 0,01$$

$$I_a = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^4$$

$$D/b = 17 / 45,2 = 0,376$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p0}) \geq 1/3 \quad n = 0,49$$

$$k = (4,82 - 5 \cdot D/b) \cdot (I_s / I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \cdot 17/45,2) \cdot (0,03 / 4,8 \cdot 10^{-6})^{0,49} + 0,43 = 213,36$$

Adotado  $k=4,0$

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma)^{0,5}} = \frac{45,2/1,2}{0,95(4 \cdot 20000 / 4,05)^{0,5}} =$$

$$= 0,247 < 0,673$$

Logo  $b_{ef2} = b = 45,2 \text{ mm}$

- Alma – elemento AA –  $k=4,0$

$$b = b_w - 2t - 2r_i = 100 - 2 \cdot 1,2 - 2 \cdot 1,2 = 95,2 \text{ mm}$$

$$b/t = 95,2/1,2 = 79,33 < 200 \text{ ok.}$$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/\sigma)^{0,5}} = \frac{95,2/1,2}{0,95(4.20000/4,05)^{0,5}} = 0,519 < 0,673$$

Logo  $b_{ef3} = b = 95,2 \text{ mm}$

Como os enrijecedores, as mesas e a alma são efetivas, tem-se:

$$A_{ef} = A = 2,71 \text{ cm}^2$$

Portanto, a força axial resistente de cálculo devido à instabilidade global é dada por

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma = \frac{0,124 \cdot 2,71 \cdot 2500}{1,2} = 700 \text{ kgf} = 7,0 \text{ kN}$$

$$= 7,0 \text{ kN}$$

## 2 - Instabilidade da barra por distorção

Para os perfis de seção Ue submetidos à compressão centrada, a verificação à instabilidade distorcional é dispensada se a relação  $D/b_w$  for igual ou superior aos valores indicados na tabela 4.2. Neste exemplo, tem-se que:

$$b_w/t = 83,33 \text{ e } b_f/b_w = 0,5$$

Da tabela 4.2, por interpolação linear, tem-se:

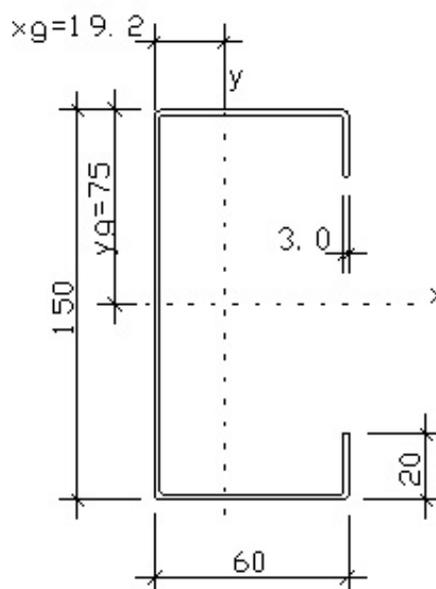
$b_f/b_w$	$b_w/t$		
	100	83,33	50
0,4	0,04	0,0533	0,08
0,5		0,0716	
0,6	0,06	0,0900	0,15

$$\text{Como } \frac{D}{b_w} = \frac{17}{100} = 0,17 > \left( \frac{D}{b_w} \right)_{\min} = 0,0716$$

logo a instabilidade distorcional não precisa ser verificada.

**Exemplo 05** - Cálculo da força axial resistente à instabilidade por flexão de um pilar com seção do tipo Ue 150×60×20×3,0 mm e comprimento de 6,0 m com um travamento no meio do vão na direção de menor inércia ( $k_x=1,0$   $k_y=k_z=0,5$ ).

Características geométricas do perfil Ue 150×60×20×3,0 mm segundo a ABNT NBR 6355:2012:



$$\begin{aligned} A &= 8,71 \text{ cm}^2 & I_x &= 298,07 \text{ cm}^4 & I_y &= 41,94 \text{ cm}^4 \\ W_x &= 39,74 \text{ cm}^3 & W_y &= 10,28 \text{ cm}^3 \\ r_x &= 5,85 \text{ cm} & r_y &= 2,19 \text{ cm} \\ I_t &= 0,261 \text{ cm}^4 & x_0 &= 4,55 \text{ cm} \\ I_w &= 2090,94 \text{ cm}^6 \\ r_0 &= 7,73 \text{ cm} \\ r_i &= t = 3,0 \text{ mm} \\ f_y &= 25 \text{ kN/cm}^2 \\ E &= 20000 \text{ kN/cm}^2 \\ G &= 7700 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

1 - Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

1.1 - Cálculo  $N_e$

$$L_x = 600 \text{ cm} \quad L_y = 300 \text{ cm} \\ L_t = 300 \text{ cm}$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 20000 \cdot 298,07}{(600)^2} = 163,44 \text{ kN}$$

## Dimensionamento de barras comprimidas

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 20000 \cdot 41,94}{(300)^2} = 91,98 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E I_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] =$$

$$= \frac{1}{7,73^2} \left[ \frac{\pi^2 20000 \cdot 2090,94}{(300)^2} + 7700 \cdot 0,261 \right] =$$

$$= 110,38 \text{ kN}$$

Perfil monossimétrico: em relação ao eixo X [ABNT NBR14762:2010 - 9.7.2.2]

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$N_{exz} =$$

$$= \frac{163,44 + 110,38}{2[1 - (4,55 / 7,73)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 163,44 \cdot 110,38 \cdot [1 - (4,55 / 7,73)^2]}{(163,44 + 110,38)^2}} \right]$$

$$= 81,89 \text{ kN}$$

Para perfis monossimétricos  $N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{exz}$ :

$$N_e = 81,89 \text{ kN}$$

modo de flambagem global: flexotorção

- Índice de esbelteza reduzido devido à instabilidade global

$$\lambda_0 = \left( \frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left( \frac{8,71 \cdot 2500}{8189} \right)^{0,5} = 1,63$$

Como  $\lambda_0 > 1,5$ , o fator de redução é dado por:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

ou pela tabela 5.1. Assim, tem-se que

$$\chi = 0,330.$$

Cálculo da área efetiva na tensão

$$\sigma = \chi \cdot f_y = 0,330 \cdot 25 = 8,25 \text{ kN / cm}^2$$

- Enrijecedor de borda – elemento com borda livre AL –  $k=0,43$

$$b = D - t - r_i = 20 - 3 - 3 = 14 \text{ mm}$$

Índice de esbelteza reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma)^{0,5}} = \frac{14/3}{0,95(0,43 \cdot 20000 / 8,25)^{0,5}} =$$

$$= 0,152 < 0,673$$

Logo

- Mesa – elemento com enrijecedor de borda -  $0,43 \leq k \leq 4,0$

$$b = b_w - 2t - 2r_i = 60 - 2 \cdot 3 - 2 \cdot 3 = 48 \text{ mm}$$

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623(E / \sigma)^{0,5}} = \frac{48/3}{0,623(20000 / 8,25)^{0,5}} =$$

$$= 0,522 < 0,673$$

Assim, o enrijecedor de borda não é necessário e  $b_{ef} = b = 48 \text{ mm}$  e  $d_{ef} = d_s = 14 \text{ mm}$

- Alma – elemento AA –  $k=4,0$

$$b = b_w - 2t - 2r_i = 150 - 2 \cdot 3 - 2 \cdot 3 = 138 \text{ mm}$$

$$b/t = 138/3 = 46 < 200 \text{ ok.}$$

Índice de esbelteza reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma)^{0,5}} = \frac{138/3}{0,95(4 \cdot 20000 / 8,25)^{0,5}} =$$

$$= 0,492 < 0,673$$

Logo  $b_{ef3} = b = 138 \text{ mm}$

Como os enrijecedores, as mesas e a alma são efetivas, tem-se:

$$A_{ef} = A = 8,71 \text{ cm}^2$$

Portanto, a força axial resistente de cálculo devido à instabilidade global é dada por

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma = \frac{0,092 \cdot 8,71 \cdot 2500}{1,2} =$$

$$= 1669,42 \text{ kgf} = 16,69 \text{ kN}$$

**Exemplo 06** - Cálculo da força axial resistente à instabilidade distorcional de um pilar com seção do tipo Ue 100×50×17×3,00 mm e comprimento de 3,0 m.

$$A = 6,43 \text{ cm}^2 \quad f_y = 25 \text{ kN/cm}^2 \\ E = 20000 \text{ kN/cm}^2 \quad G = 7700 \text{ kN/cm}^2$$

Para  $b_w/t=33,33$ , a Tabela 4.2 não fornece as dimensões mínimas do enrijecedor para a dispensa da verificação da capacidade resistente devido à instabilidade distorcional da seção transversal [ABNT NBR 14762 - 9.7.3].

Por meio do programa DimPerfil, a força axial crítica à flambagem distorcional é igual a  $N_{\text{dist}} = 575,60 \text{ kN}$ .

Logo, o índice de esbeltez reduzido devido à flambagem distorcional é dado por:

$$\lambda_{\text{dist}} = \left( \frac{Af_y}{N_{\text{dist}}} \right)^{0,5} = \left( \frac{6,43 \cdot 25}{575,60} \right)^{0,5} = 0,528 \leq 0,561$$

portanto  $\chi_{\text{dist}} = 1,0$

Assim, a força axial resistente devido à instabilidade distorcional é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi_{\text{dist}} Af_y}{\gamma} = \frac{1,0 \cdot 6,43 \cdot 25}{1,2} = 133,96 \text{ kN}$$



# ***Capítulo 7***

---

## Dimensionamento de Barras sob Flexão

## Dimensionamento de barras sob flexão

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser tomado como o menor valor entre:

- 1 – Momento de cálculo que causa escoamento na seção na fibra mais solicitada.
- 2 – Momento de cálculo referente à instabilidade lateral com torção.
- 3 – Momento de cálculo referente à instabilidade distorcional da seção transversal.

### 7.1 – Início de Escoamento da Seção Efetiva

O momento fletor resistente de cálculo que causa o escoamento na seção efetiva na fibra mais solicitada é dado pela equação 7.1:

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma \quad \text{com } \gamma = 1,1 \quad (\text{eq. 7.1})$$

onde  $W_{ef}$  é o módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, com  $\sigma$  calculada para o estado-limite último de escoamento da seção,  $\sigma = f_y$ .

Deve-se observar que nessa verificação o centro geométrico da seção efetiva não coincide como da seção bruta. Essa diferença modifica a coordenada da fibra mais solicitada, para o cálculo de  $W_{ef}$ .

### 7.2 – Instabilidade Lateral com Torção

A instabilidade lateral com torção ocorre em vigas fletidas, ocasionada pela instabilidade global da viga não contida lateralmente. É possível entender a origem desse fenômeno observando uma viga fletida e isolando esquematicamente a parte comprimida da tracionada, conforme mostra a Figura 7.1. A região comprimida ao longo do comprimento da barra pode ser analisada como um “pilar” submetido a esforços de compressão e com apoios elásticos

ao longo de um de seus lados (que é formado pela região tracionada). Esse pilar também está sujeito instabilidade por flexão, porém sua direção de menor inércia, nesse caso é a do eixo x. Como a “barra” comprimida está apoiada num de seus lados, quando ocorrer a perda de estabilidade à flexão, o perfil tenderá sofrer rotação em torno do eixo longitudinal. Dessa forma, a rigidez envolvida nesse modo de instabilidade é a rigidez à flexão em torno do eixo y, além da rigidez à torção e ao empenamento.

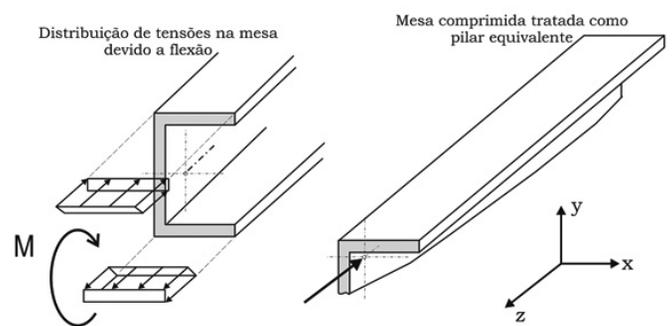


Figura 7.1 – Tensões em viga sob flexão

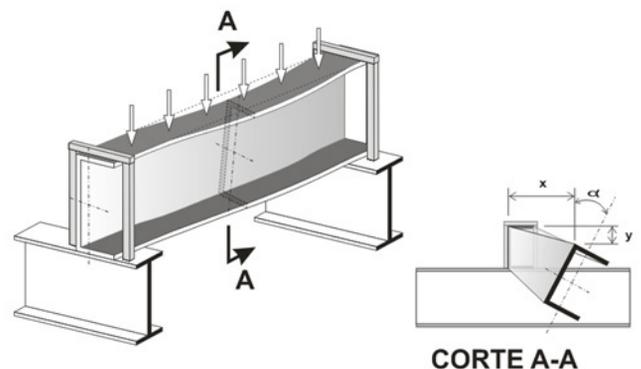


Figura 7.2 – Ilustração da instabilidade lateral com torção na viga (ilustração adaptada de Silva e Pannoni - 2010)

A Figura 7.2 mostra a posição deslocada da viga após a ocorrência da instabilidade lateral com torção. Os valores de x, y e o ângulo  $\alpha$  indicados no corte A-A correspondem respectivamente ao deslocamento lateral da viga em função da perda da instabilidade (x), flecha da viga em função do carregamento, e o ângulo ocasionado pela torção envolvida no fenômeno. A proporção dos deslocamentos exibidos está exagerada para facilitar a visualização dos mesmos.

O momento fletor resistente de cálculo referente à instabilidade lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado pela equação 7.2:

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \text{com } \gamma=1,1 \quad (\text{eq. 7.2})$$

onde  $W_{c,ef}$  é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, adotando  $\sigma = \chi_{FLT} f_y$  e  $\chi_{FLT}$  é o fator de redução associado à instabilidade lateral com torção, calculado pelas expressões 7.3.

$$\chi_{FLT} = 1,0 \quad \text{para } \lambda_0 \leq 0,6:$$

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) \quad \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \quad (\text{eq. 7.3})$$

$$\chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,336:$$

em que  $\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido dado pela equação 7.4,

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (\text{eq. 7.4})$$

onde  $W_c$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida e  $M_e$  é o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção. As equações para o cálculo de  $M_e$  para os casos mais comuns encontram-se no item 9.8.2.2 da norma, reapresentados a seguir.

As expressões apresentadas para o cálculo de  $M_e$  foram deduzidas para carregamento aplicado na posição do centro de torção. A favor da segurança, também podem ser empregadas nos casos de carregamento aplicado em posição estabilizante, isto é, que tende a restaurar a posição original da barra (por exemplo, carregamento gravitacional aplicado na parte inferior da barra). Em casos de carregamento aplicado em posição desestabilizante, consultar bibliografia especializada.

Para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x), o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção é dado pela equação 7.5:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} \quad (\text{eq. 7.5})$$

Barras com seção Z pontossimétrica (simétricas em relação a um ponto), com carregamento no plano da alma, o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção é dado pela equação 7.6:

$$M_e = 0,5 C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} \quad (\text{eq. 7.6})$$

Barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x, o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção é dado pela equação 7.7:

$$M_e = C_b (N_{ey} G I_t)^{0,5} \quad (\text{eq. 7.7})$$

em que  $N_{ey}$ ,  $N_{ez}$  e  $r_0$  foram definidos no capítulo 6, considerando  $K_y=1,0$  e  $K_z=1,0$

Os valores de  $K_y L_y$  e  $K_z L_z$  podem ser tomados com valores inferiores a  $L_y$  e  $L_z$ , respectivamente, desde que justificados com base em bibliografia especializada. Para os balanços com a extremidade livre sem contenção lateral,  $K_y L_y$  e  $K_z L_z$  podem resultar maiores que  $L_y$  e  $L_z$ , respectivamente, em função das condições de vínculo, por exemplo, em barras contínuas conectadas apenas pela mesa tracionada, portanto com deslocamentos laterais, rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento parcialmente impedidos no apoio. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada.

O fator de modificação para diagrama de momentos fletores não uniformes ( $C_b$ ) é obtido pela expressão 7.8 ou, a favor da segurança, pode ser tomado igual a 1,0.

$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (\text{eq. 7.8})$$

## Dimensionamento de barras sob flexão

onde  $M_{\max}$  é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado;  $M_A$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º. quarto do trecho analisado;  $M_B$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado;  $M_C$  é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º. quarto do trecho analisado;

Para balanços com a extremidade livre sem contenção lateral e para barras submetidas à flexão composta,  $C_b$  deve ser tomado igual a 1,0.

Para uma viga biapoiada submetida a carregamento distribuído uniforme tem-se o momento máximo e os momentos nos pontos A, B e C indicados na Figura 7.3.

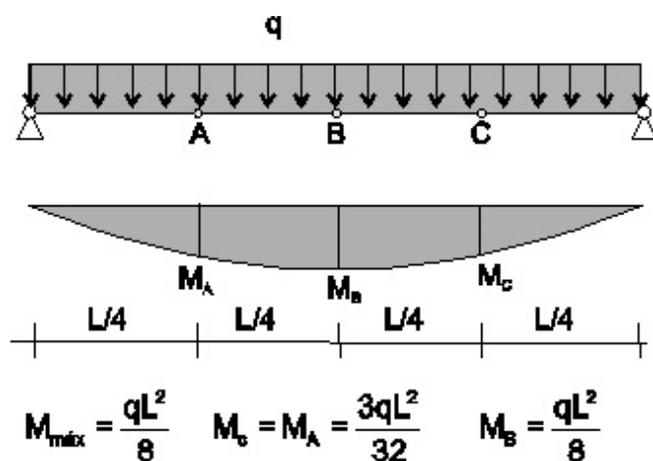


Figura 7.3 – Viga submetida a carregamento distribuído.

Substituindo os momentos na equação 7.8, tem-se que:

$$C_b = \frac{12,5 \cdot \frac{qL^2}{8}}{2,5 \cdot \frac{qL^2}{8} + 3 \cdot \frac{3qL^2}{32} + 4 \cdot \frac{qL^2}{8} + 3 \cdot \frac{3qL^2}{32}} = 1,13$$

Considerando uma viga biapoiada submetida a uma força concentrada no meio do vão tem-se o momento máximo e os momentos nos pontos A, B e C indicados na Figura 7.4.

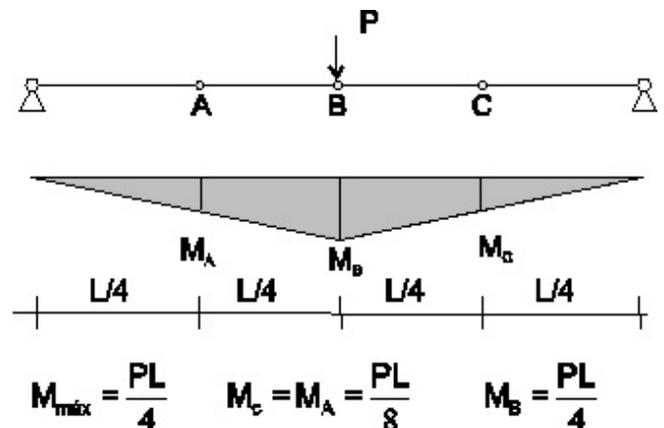


Figura 7.4 – Viga submetida a uma força concentrada.

Substituindo os momentos na equação 7.8, tem-se que:

$$C_b = \frac{12,5 \cdot \frac{PL}{4}}{2,5 \cdot \frac{PL}{4} + 3 \cdot \frac{PL}{8} + 4 \cdot \frac{PL}{4} + 3 \cdot \frac{PL}{8}} = 1,31$$

Para barras com seção monossimétricas sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, o momento fletor resistente de cálculo referente à instabilidade lateral com torção deve ser calculado por meio da equação 7.9.

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right] \quad (\text{eq. 7.9})$$

onde  $N_{ex}$  e  $N_{ez}$  são as forças axiais críticas de flambagem global elástica em relação ao eixo de simetria X e flambagem por torção, respectivamente,  $r_0$  é o raio de giração da seção bruta em relação ao centro de torção.

O valor de  $C_s$  depende da orientação do momento fletor. Se o momento fletor causar flexão no mesmo lado do centro de torção tem-se que  $C_s = +1,0$ . Caso o momento fletor causa flexão no lado contrário do centro de torção tem-se que  $C_s = -1,0$ .

O valor de  $C_m$  é definido pela equação 7.10.

$$C_m = 0,6 - 0,4 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \quad (\text{eq. 7.10})$$

onde  $M_1$  é o menor e  $M_2$  é o maior dos dois momentos fletores solicitantes de cálculo nas extremidades do trecho sem travamento lateral. A relação  $M_1/M_2$  é positiva quando esses momentos provocarem curvatura reversa e negativa em caso de curvatura simples. Se o momento fletor em qualquer seção intermediária for superior a  $M_2$ , o valor de  $C_m$  deve ser igual a 1,0.

O parâmetro  $j$  depende da geometria da seção transversal. Para as seções U simples, U enrijecido e cartola onde o eixo X é o eixo de simetria, o parâmetro  $j$  é dado pela equação 7.11.

$$j = \frac{1}{2 I_y} (\beta_w + \beta_f + \beta_\ell) + x_0 \quad (\text{eq. 7.11})$$

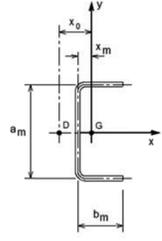
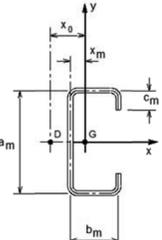
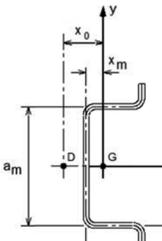
Os parâmetros  $\beta_w$  e  $\beta_f$  são referentes a geometria da alma e da mesa, respectivamente, e são expressos pelas expressões 7.12 e 7.13.

$$\beta_w = - \left[ \frac{t x_m a_m^3}{12} + t x_m^3 a_m \right] \quad (\text{eq. 7.12})$$

$$\beta_f = \frac{t}{2} \left[ (b_m - x_m)^4 - x_m^4 \right] + \frac{t a_m^2}{4} \left[ (b_m - x_m)^2 - x_m^2 \right] \quad (\text{eq. 7.13})$$

onde  $t$  é a espessura do perfil e os demais parâmetros dependem da seção transversal e estão indicados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Parâmetros geométricos.

Seção	Parâmetros
	$\beta_\ell = 0$ $x_m = \frac{b_m^2}{a_m + 2b_m}$ $x_0 = b_m \left( \frac{3a_m^2 b_m}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m} \right) + x_m$ $a_m = b_w - t$ $b_m = b_f - 0,5t$
	$\beta_\ell = 2c_m t (b_m - x_m)^3 + \frac{2}{3} t (b_m - x_m) \left[ \left( \frac{a_m}{2} \right)^3 - \left( \frac{a_m}{2} - c_m \right)^3 \right]$ $x_m = \frac{b_m (b_m + 2c_m)}{a_m + 2b_m + 2c_m}$ $x_0 = b_m \left[ \frac{3a_m^2 b_m + c_m (6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m (8c_m^2 - 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_m$ $a_m = b_w - t$ $b_m = b_f - t$ $c_m = D - 0,5t$
	$\beta_\ell = 2c_m t (b_m - x_m)^3 + \frac{2}{3} t (b_m - x_m) \left[ \left( \frac{a_m + c_m}{2} \right)^3 - \left( \frac{a_m}{2} \right)^3 \right]$ $x_m = \frac{b_m (b_m + 2c_m)}{a_m + 2b_m + 2c_m}$ $x_0 = b_m \left[ \frac{3a_m^2 b_m + c_m (6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m (8c_m^2 + 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_m$ $a_m = b_w - t$ $b_m = b_f - t$ $c_m = D - 0,5t$

### 7.3 – Instabilidade por Distorção da Seção Transversal

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à instabilidade por distorção, o momento fletor resistente de cálculo deve ser calculado pela seguinte expressão 7.14

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma} \quad \text{com } \gamma = 1,1 \quad (\text{eq. 7.14})$$

onde  $W$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento e  $\chi_{dist}$  - fator de redução associado à instabilidade distorcional, calculado por meio da equação 7.15.

$$\chi_{dist} = 1,0 \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673$$

$$\chi_{dist} = \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \frac{1}{\lambda_{dist}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,673$$

(eq. 7.15)

em que  $\lambda_{dist}$  é o índice de esbeltez distorcional reduzido dado pela equação 7.16,

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} \quad (\text{eq. 7.16})$$

onde  $M_{dist}$  é o momento fletor crítico de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica. O programa DimPerfil fornece o valor de  $M_{dist}$  automaticamente para todos os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012.

A verificação da instabilidade por distorção é um procedimento complexo de ser realizado analiticamente. Assim, para as barras com seções U enrijecidas e seções Z enrijecidas, a Tabela 4.2, retirada da ABNT NBR 14762:2010, fornece o tamanho mínimo do enrijecedor de borda em relação à dimensão da alma,  $D/b_w$ , para se dispensar a verificação da instabilidade por distorção.

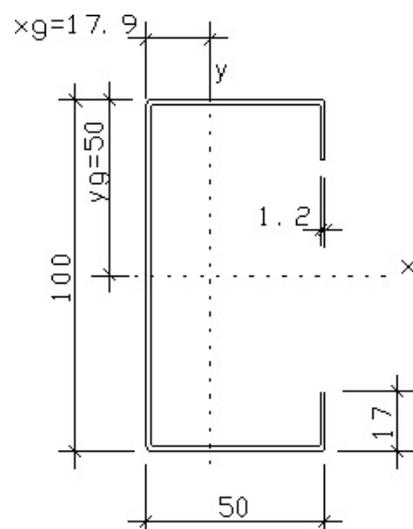
Para barras com enrijecedores de borda menores ao indicado na Tabela 4.2 ou com seções diferentes de U enrijecidas e Z enrijecidas, a instabilidade por distorção deve ser verificada com o auxílio de programas computacionais específicos para esse fim. O programa DimPerfil faz essa verificação para todos os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012.

Os perfis U ou Z sem enrijecedor de borda fletidos, geralmente, não apresentam instabilidade por distorção sendo, portanto, dispensados dessa verificação. Nos casos de perfis fletidos com essas geometrias possuírem um painel conectado à mesa tracionada e a mesa comprimida livre, a instabilidade distorcional do conjunto alma-mesa comprimida pode ser crítica sendo necessária uma verificação especial, não contemplada neste manual.

Exemplo para as verificações ao momento fletor:

**Exemplo 07** - Cálculo do momento fletor resistente em torno do eixo X do perfil Ue 100×50×17×1,2. O comprimento da viga é de 400 cm, sem travamentos intermediários, submetido a um carregamento distribuído, resistência ao escoamento de 25,0 kN/cm<sup>2</sup>:

Características geométricas do perfil Ue 100×50×17×1,2 segundo a ABNT NBR 6355:2012



$$\begin{aligned}
A &= 2,71 \text{ cm}^2 \\
I_x &= 44,15 \text{ cm}^4 & I_y &= 10,12 \text{ cm}^4 \\
W_x &= 8,83 \text{ cm}^3 & W_y &= 3,15 \text{ cm}^3 \\
r_x &= 4,03 \text{ cm} & r_y &= 1,93 \text{ cm} \\
I_t &= 0,013 \text{ cm}^4 \\
I_w &= 246,61 \text{ cm}^6 \\
r_0 &= 6,19 \text{ cm} & x_0 &= 4,28 \text{ cm} \\
r_i &= t = 1,2 \text{ mm} \\
f_y &= 25 \text{ kN/cm}^2 \\
E &= 20000 \text{ kN/cm}^2 \\
G &= 7700 \text{ kN/cm}^2
\end{aligned}$$

(i) Início do escoamento  $M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1}$

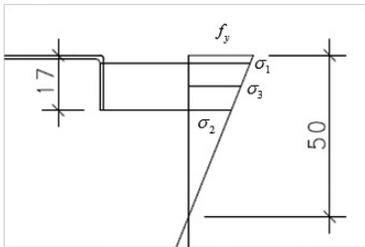
Cálculo das larguras efetivas

- Enrijecedor – Elemento AL

$$b = D - t - r_i = 17 - 1,2 - 1,2 = 14,6 \text{ mm}$$

$$b/t = 14,6/1,2 = 12,167$$

Por semelhança de triângulos, tem-se:



$$\frac{\sigma_1}{f_y} = \frac{5 - 0,12 - 0,12}{5} \therefore \sigma_1 = -23,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_2}{f_y} = \frac{5 - 1,7}{5} \therefore \sigma_2 = -16,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = -20,15 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-16,5}{-23,8} = 0,693$$

Elemento comprimido com tensões variáveis

Coefficiente de flambagem (Tabela 3.3 – caso b)

$$k = \frac{0,578}{\psi + 0,34} = 0,560$$

Índice de esbelteza reduzido do elemento

$$\begin{aligned}
\lambda_p &= \frac{b/t}{0,95(kE/\sigma)^{0,5}} = \\
&= \frac{14,6/1,2}{0,95(0,560 \cdot 20000 / 23,8)^{0,5}} = 0,590 < 0,673
\end{aligned}$$

Logo  $b_{ef} = b = 14,6 \text{ mm}$

- Mesa comprimida – elemento com enrijecedor de borda -  $0,43 \leq k \leq 4,0$

Tensão  $f_y$

$$b = b_w - 2t - 2r_i = 50 - 2 \cdot 1,2 - 2 \cdot 1,2 = 45,2 \text{ mm}$$

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623(E/f_y)^{0,5}} = \frac{45,2/1,2}{0,623(20000/25)^{0,5}}$$

$$\lambda_{p0} = 2,138 > 0,673$$

Assim, deve-se calcular um coeficiente de instabilidade que leve em conta a contribuição do enrijecedor de borda.

Momento de inércia do enrijecedor

$$I_s = (td^3 \text{sen}^2 \theta) / 12 =$$

$$= (0,12 \cdot 1,46^3 \text{sen}^2 90) / 12 = 0,03 \text{ cm}^4$$

Momento de inércia de referência do enrijecedor

$$I_a = 399t^4 [0,487\lambda_{p0} - 0,328]^3 \leq t^4 [56\lambda_{p0} + 5]$$

$$I_a = 399 \cdot 0,12^4 [0,487 \cdot 2,138 - 0,328]^3 \leq 0,12^4 [56 \cdot 2,138 + 5]$$

$$I_a = 0,0258 \text{ cm}^4$$

$$D/b = 17 / 45,2 = 0,376$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p0}) \geq 1/3 \quad n = 0,33$$

$$k = (4,82 - 5 \cdot D/b) \cdot (I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5 \cdot 17/45,2) \cdot (0,03/0,0258)^{0,33} + 0,43 = 3,52$$

Índice de esbelteza reduzido da mesa comprimida

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/f_y)^{0,5}}$$

$$\lambda_p = \frac{45,2/1,2}{0,95(3,52 \cdot 20000 / 25)^{0,5}} = 0,747 > 0,673$$

## Dimensionamento de barras sob flexão

Logo

$$b_{ef} = \frac{b}{\lambda_p} \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) = \frac{45,2}{0,747} \left( 1 - \frac{0,22}{0,747} \right) = 42,7 \text{ mm}$$

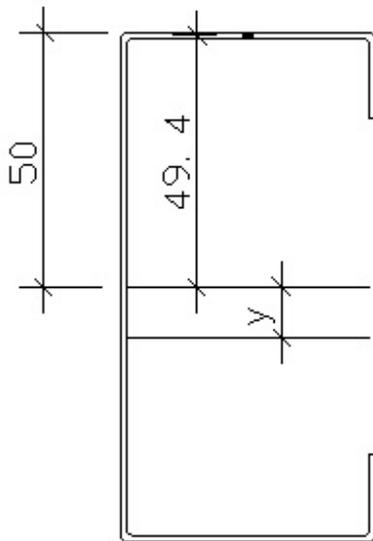
Comprimento de perfil a retirar na mesa

$$l_{ret} = 45,2 - 42,7 = 2,5 \text{ mm}$$

$$A_{ret} = 0,25 \cdot 0,12 = 0,03 \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = 2,71 - 0,03 = 2,68 \text{ cm}^2$$

Momento de Inércia da parte a retirar



$$I_{x,ret} = \frac{0,25 \cdot 0,12^3}{12} + 0,03 \cdot (5 - 0,12/2)^2 = 0,75 \text{ cm}^4$$

Rebaixo do eixo baricêntrico devido à retirada da mesa

$$\frac{0,03}{2,68} = \frac{y}{50 - 1,2/2} \quad y = 0,55 \text{ mm}$$

$$y_G = 50 + 0,55 = 50,55 \text{ mm}$$

- Alma – Elemento AA

Após a aplicação do conceito de largura efetiva na mesa e no enrijecedor comprimido, tem-se que  $A_{ef} = 2,68 \text{ cm}^2$  e  $y_G = 5,055 \text{ cm}$ .  
 $b = b_w - 2t - 2r_i = 100 - 2 \cdot 1,2 - 2 \cdot 1,2 = 95,2 \text{ mm}$

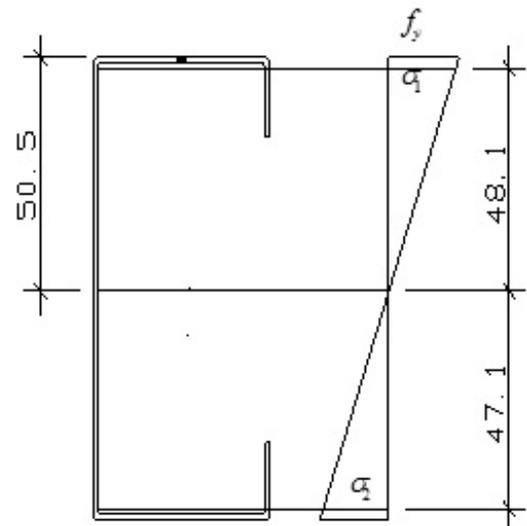
$$b/t = 95,2/1,2 = 79,33$$

Cálculo do coeficiente de flambagem

$$\frac{\sigma_1}{f_y} = \frac{48,1}{50,5} \therefore \sigma_1 = -23,81 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_2}{f_y} = \frac{47,1}{50,5} \therefore \sigma_2 = 23,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{23,31}{-23,81} = -0,98$$



Coeficiente de flambagem (Tabela 3.2 – caso d -  $\psi < -0,236$ )

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi) =$$

$$= 4 + 2(1 + 0,98)^3 + 2(1 + 0,98) = 23,48$$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma_1)^{0,5}} =$$

$$= \frac{95,2/1,2}{0,95(23,48 \cdot 20000 / 23,81)^{0,5}} = 0,595 < 0,673$$

Logo  $b_{ef} = b = 95,2 \text{ mm}$

Cálculo do módulo elástico efetivo da seção

$$A_{ef} = 2,68 \text{ cm}^2 \quad I_{x,ef} = 44,15 - 0,75 = 43,4 \text{ cm}^4$$

Translação do momento de inércia em relação ao eixo que passa pelo CG da seção original para o eixo que passa pelo CG da seção efetiva

$$I_{x,ef} = I_{x,G} + A.d^2$$

$$I_{x,G} = 43,4 - 2,68.0,055^2 = 43,39 \text{ cm}^4$$

$$W_{ef} = \frac{43,39}{5,055} = 8,6 \text{ cm}^3$$

Logo

$$M_{Rd} = \frac{8,6.25}{1,1} = 195,45 \text{ kN.cm}$$

(ii) Estado limite de instabilidade lateral com torção

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{ef} f_y}{1,1}$$

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções tipo Ue é dado por:

$$M_e = C_{br0}(N_{ey} N_{ez}) 0,5$$

onde  $N_{ey}$  e  $N_{ez}$  são dados por:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 20000.10,12}{(400)^2} = 12,49 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E I_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] =$$

$$= \frac{1}{6,19^2} \left[ \frac{\pi^2 20000.246,61}{(400)^2} + 7700.0,013 \right] =$$

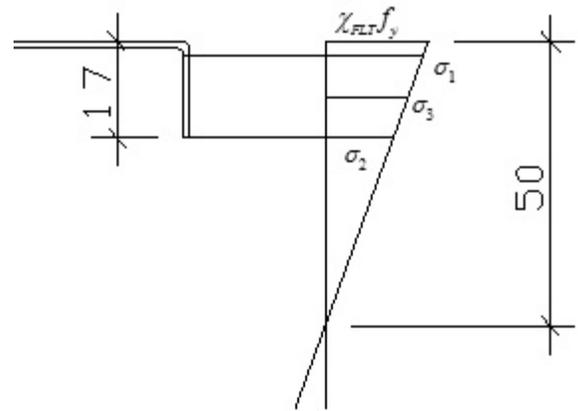
$$= 10,55 \text{ kN}$$

Neste exemplo será adotado  $C_b = 1,0$

$$M_e = 1,0.6,19.(12,49.10,55)^{0,5} = 71,1 \text{ kN.cm}$$

Índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = \left( \frac{8,83.25}{71,1} \right)^{0,5} = 1,762$$



O fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é dado por:

$$\chi_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2} = 0,322$$

Cálculo das larguras efetivas na tensão

$$\sigma = \chi_{FLT} f_y = 0,322.25 = 8,05 \text{ kN/cm}^2$$

- Enrijecedor – Elemento AL

$$b = D - t - r_i = 17 - 1,2 - 1,2 = 14,6 \text{ mm}$$

$$b/t = 14,6/1,2 = 12,167$$

Por semelhança de triângulos, tem-se:

$$\frac{\sigma_1}{\chi_{FLT} f_y} = \frac{5 - 0,12 - 0,12}{5} \therefore \sigma_1 = -7,66 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_2}{\chi_{FLT} f_y} = \frac{5 - 1,7}{5} \therefore \sigma_2 = -5,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = -6,49 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-5,31}{-7,66} = 0,693$$

Elemento comprimido com tensões variáveis

Coefficiente de instabilidade (Tabela 3.3 – caso b)

$$k = \frac{0,578}{\psi + 0,34} = 0,560$$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

## Dimensionamento de barras sob flexão

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma_3)^{0,5}} = \frac{14,6/1,2}{0,95(0,560.20000 / 7,66)^{0,5}} = 0,335 < 0,673$$

Logo  $b_{ef} = b = 14,6$  mm  
- Mesa comprimida – elemento com enrijecedor de borda -  $0,43 \leq k \leq 4,0$

Tensão  $\chi_{FLT} f_y$   
 $b = b_w - 2t - 2r_i = 50 - 2.1,2 - 2.1,2 = 45,2$  mm

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623(E / \chi_{FLT} f_y)^{0,5}} = \frac{45,2/1,2}{0,623(20000 / 0,322.25)^{0,5}} = 1,213 > 0,673$$

Assim, deve-se calcular um coeficiente de flambagem que leve em conta a contribuição do enrijecedor de borda.

Momento de inércia do enrijecedor

$$I_s = (td^3 \cdot \sin^2 \theta) / 12 = (0,12.1,46^3 \sin^2 90) / 12 = 0,03 \text{ cm}^4$$

Momento de inércia de referência do enrijecedor

$$I_a = 399t^4 [0,487\lambda_{p0} - 0,328]^3 \leq t^4 [56\lambda_{p0} + 5]$$

$$I_a = 399.0,12^4 [0,487.1,213 - 0,328]^3 \leq 0,12^4 [56.1,213 + 5]$$

$$I_a = 0,0015 \leq 0,015 \text{ cm}^4$$

Adotado  $I_a = 0,015 \text{ cm}^4$

Como  $I_s > I_a$  todo o enrijecedor é efetivo

$$D/b = 17 / 45,2 = 0,38$$

$$n = (0,582 - 0,122\lambda_{p0}) \geq 1/3 \quad n = 0,43$$

$$k = (4,82 - 5.D/b) \cdot (I_s / I_a)^n + 0,43 \leq 4$$

$$k = (4,82 - 5.17/45,2) \cdot (0,03/0,015)^{0,43} + 0,43 = 4,4$$

Adotado  $k=4$

Índice de esbeltez reduzido da mesa comprimida

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \chi_{FLT} f_y)^{0,5}} = \frac{45,2/1,2}{0,95(4.20000 / 0,322.25)^{0,5}} = 0,398 < 0,673$$

Logo  $b_{ef} = b = 45,2$  mm

- Alma – Elemento AA

Como o enrijecedor e a mesa comprimida são totalmente efetivos, após a aplicação do conceito de largura efetiva nesses elementos, a alma está sob flexão pura, ou seja,  $\psi = -1$ .

$$b = b_w - 2t - 2r_i = 100 - 2.1,2 - 2.1,2 = 95,2$$
 mm

$$b/t = 95,2/1,2 = 79,33$$

A tensão de compressão na alma é dada por

$$\frac{\sigma_1}{\chi_{FLT} f_y} = \frac{5 - 0,12 - 0,12}{5} \therefore \sigma_1 = -7,66 \text{ kN/cm}^2$$

Coeficiente de flambagem (Tabela 3.2 – caso d -  $\psi < -0,236$ )

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi) = 4 + 2(1 + 1)^3 + 2(1 + 1) = 24$$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma_1)^{0,5}} = \frac{95,2/1,2}{0,95(24.20000 / 7,66)^{0,5}} = 0,334 < 0,673$$

Logo  $b_{ef} = b = 95,2$  mm

Assim, todo o perfil é efetivo

Portanto

$$M_{Rd} = \frac{0,322.8.83.25}{1,1} = 64,6 \text{ kN.cm}$$

(iii) Estado-limite de instabilidade distorcional  
Neste exemplo, tem-se que:

$$b_w/t = 83,33 \text{ e } b_f/b_w = 0,5$$

Da tabela 4.2, por interpolação linear, tem-se:

$b_f/b_w$	$b_w/t$		
	100	83,33	50
0,4	0,04	0,0533	0,08
0,5		0,0716	
0,6	0,06	0,0900	0,15

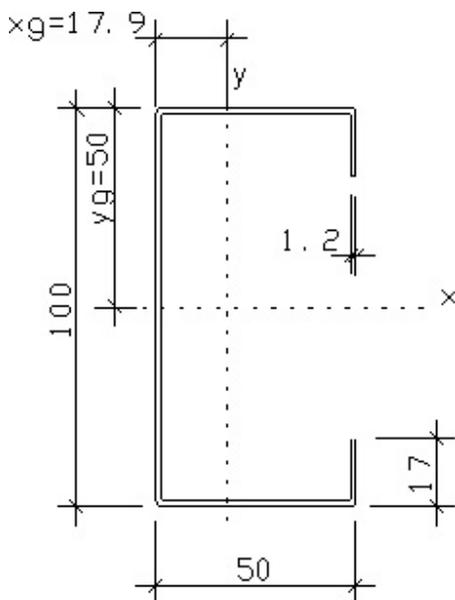
Como  $\frac{D}{b_w} = \frac{17}{100} = 0,17 > \left(\frac{D}{b_w}\right)_{\min} = 0,1633$

Logo a instabilidade distorcional não precisa ser verificada.

Logo o momento resistente de cálculo desse perfil é 64,6 kN.cm

**Exemplo 08** - Cálculo do momento fletor resistente que causa escoamento na fibra mais solicitada e devido à instabilidade lateral com torção em torno do eixo Y do perfil padronizado Ue 100×50×17×1,2. O comprimento da viga é de 400 cm, sem travamentos intermediários, submetido a um carregamento distribuído, tensão de escoamento de 25,0 kN/cm<sup>2</sup>:

Características geométricas do perfil Ue 100×50×17×1,2 segundo a ABNT NBR 6355:2012



$A = 2,71 \text{ cm}^2$   
 $I_x = 44,15 \text{ cm}^4$   
 $W_x = 8,83 \text{ cm}^3$   
 $I_y = 10,12 \text{ cm}^4$   
 $W_y = 3,15 \text{ cm}^3$

$r_x = 4,03 \text{ cm}$   
 $I_x = 0,013 \text{ cm}^4$   
 $I_w = 246,61 \text{ cm}^6$   
 $r_0 = 6,19 \text{ cm}$   
 $r_i = t = 1,2 \text{ mm}$   
 $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$   
 $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$   
 $G = 7700 \text{ kN/cm}^2$

$r_y = 1,93 \text{ cm}$

$x_0 = 4,28 \text{ cm}$

(i) Início do escoamento  $M_{Rd} = \frac{W_{ef} f_y}{1,1}$

Cálculo das larguras efetivas – Como o eixo Y não é de simetria, não se conhece a tensão atuante na alma do perfil, assim o cálculo da largura efetiva torna-se iterativo.

- Alma totalmente comprimida – elemento AA –  $k=4,0$

1ª Iteração - Tensão  $f_y$   
 $b = b_w - 2t - 2r_i = 100 - 2 \cdot 1,2 - 2 \cdot 1,2 = 95,2 \text{ mm}$

$b/t = 95,2/1,2 = 79,33$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/f_y)^{0,5}} = \frac{95,2/1,2}{0,95(4 \cdot 20000/25)^{0,5}} =$

$= 1,476 > 0,673$

Logo  $b_{ef1} = \frac{b}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) = 54,88 \text{ mm}$

$A_{ret} = (9,52 - 5,488) \cdot 0,12 = 0,48 \text{ cm}^2$

Rebaixamento do centro geométrico devido à retirada da alma

$\frac{0,48}{2,71} = \frac{x}{1,79 - 0,12/2} \therefore x = 0,3 \text{ cm}$

$x_G = 1,79 + 0,3 = 2,09 \text{ cm}$

Como a nova posição do centro geométrico  $x_G$  é menor do que a metade do comprimento da mesa, a máxima tensão ocorre no enrijecedor (membro tracionado). Assim, a tensão na alma é dada por

## Dimensionamento de barras sob flexão

$$\frac{\sigma}{2,09} = \frac{25}{5 - 2,09} \therefore \sigma = 17,95 \text{ kN/cm}^2$$

2ª Iteração -  $\sigma = 17,95 \text{ kN/cm}^2$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/f_y)^{0,5}} = \frac{95,2/1,2}{0,95(4.20000/17,95)^{0,5}} =$$

$$= 1,251 > 0,673$$

$$\text{Logo } b_{ef1} = \frac{b}{\lambda_p} \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) = 62,72 \text{ mm}$$

$$A_{ret} = (9,52 - 6,272) \cdot 0,12 = 0,39 \text{ cm}^2$$

Rebaixamento do centro geométrico devido à retirada da alma

$$\frac{0,39}{2,71} = \frac{x}{1,79 - 0,12/2} \therefore x = 0,25 \text{ cm}$$

$$x_G = 1,79 + 0,25 = 2,04 \text{ cm}$$

Como a nova posição do centro geométrico  $\chi_G$  é menor do que a metade do comprimento da mesa, a máxima tensão ocorre no enrijeecedor (membro tracionado). Assim, a tensão na alma é dada por

$$\frac{\sigma}{2,04} = \frac{25}{5 - 2,04} \therefore \sigma = 17,23 \text{ kN/cm}^2$$

3ª Iteração -  $\sigma = 17,23 \text{ kN/cm}^2$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE/f_y)^{0,5}} = \frac{95,2/1,2}{0,95(4.20000/17,23)^{0,5}} =$$

$$= 1,226 > 0,673$$

$$\text{Logo } b_{ef1} = \frac{b}{\lambda_p} \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) = 63,72 \text{ mm}$$

$$A_{ret} = (9,52 - 6,372) \cdot 0,12 = 0,38 \text{ cm}^2$$

Rebaixamento do centro geométrico devido à retirada da alma

$$\frac{0,38}{2,71} = \frac{x}{1,79 - 0,12/2} \therefore x = 0,25 \text{ cm}$$

$$\chi_G = 1,79 + 0,25 = 2,04 \text{ cm}$$

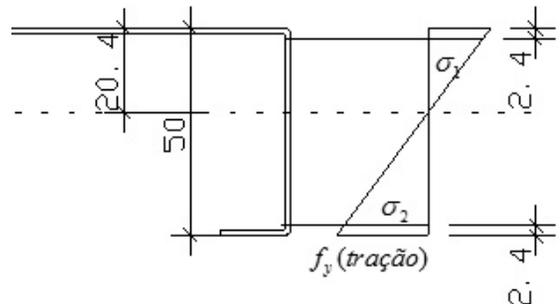
Como a nova posição do centro geométrico  $\chi_G$  é menor do que a metade do comprimento da mesa, a máxima tensão ocorre no enrijeecedor (membro tracionado). Assim, a tensão na alma é dada por:

$$\frac{\sigma}{2,04} = \frac{25}{5 - 2,04} \therefore \sigma = 17,23 \text{ kN/cm}^2$$

Convergiu!

Verificação da mesa

A distribuição de tensões na mesa após a aplicação do método das larguras efetivas na alma é dada pela figura a seguir



$$\frac{f_y}{50 - 20,4} = \frac{\sigma_1}{20,4 - 2,4} \therefore \sigma_1 = -15,2 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{f_y}{50 - 20,4} = \frac{\sigma_2}{50 - 20,4 - 2,4} \therefore \sigma_2 = 22,97 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{22,97}{-15,2} = -1,51$$

Coefficiente de flambagem (Tabela 3.3 - caso d -  $\psi < -0,236$ )

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 + \psi)$$

$$k = 4 + 2(1 + 1,51)^3 + 2(1 + 1,51) = 40,6$$

Índice de esbeltez reduzido do elemento

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95(kE / \sigma_1)^{0,5}} = \frac{45,2/1,2}{0,95(40,6.20000 / 15,2)^{0,5}} = 0,172 < 0,673$$

Logo  $b_{ef} = b = 45,2 \text{ mm}$

Cálculo do módulo elástico efetivo da seção

- Cálculo do momento de inércia da parte a retirar da alma

$$I_{ret} = 9,52 - 6,372 = 3,148 \text{ cm}$$

$$I_{y,ret} = \frac{3,148 \cdot 0,12^3}{12} + 3,148 \cdot 0,12 \cdot (1,79 - 0,12/2)^2 = 1,2 \text{ cm}^4$$

$$I_{y,ef} = 10,12 - 1,2 = 8,92 \text{ cm}^4$$

Translação para o centro geométrico

$$A_{ef} = 2,71 - 0,38 = 2,33 \text{ cm}^2$$

$$I_{y,ef,G} = 8,92 - 2,33 \cdot 0,25^2 = 8,77 \text{ cm}^4$$

Portanto, o módulo elástico efetivo relativo à fibra mais comprimida fica sendo

$$W_{ef} = \frac{8,77}{5 - 2,04} = 2,96 \text{ cm}^3$$

Logo

$$M_{Rd} = \frac{2,96 \cdot 25}{1,1} = 67,3 \text{ kN.cm}$$

(ii) Estado-limite de instabilidade lateral com torção

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{ef} f_y}{1,1}$$

O momento fletor de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções tipo Ue, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado pelo Anexo E da ABNT NBR 14762:2010.

Para perfis Ue tem-se (ABNT NBR 6355:2012):

$$a_m = b_w - t = 9,88 \text{ cm}$$

$$b_m = b_f - t = 4,88 \text{ cm}$$

$$c_m = D - t/2 = 1,64 \text{ cm}$$

Do Anexo E da ABNT NBR 14762:2010, tem-se que:

$$x_m = \frac{b_m(b_m + 2c_m)}{a_m + 2b_m + 2c_m} = 1,737 \text{ cm}$$

$$x_0 =$$

$$b_m \left[ \frac{3a_m^2 b_m + c_m(6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m(8c_m^2 - 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_m = 4,29 \text{ cm}$$

$$\beta_w = 2c_m t (b_m - x_m)^3 + \frac{2}{3} t (b_m - x_m) \left[ \left( \frac{a_m}{2} \right)^3 - \left( \frac{a_m}{2} - c_m \right)^3 \right] = 33,49 \text{ cm}^5$$

$$\beta_w = - \left[ \frac{t x_m a_m^3}{12} + t x_m^3 a_m \right] = -22,974 \text{ cm}^5$$

$$\beta_f = \frac{t}{2} \left[ (b_m - x_m)^4 - x_m^4 \right] + \frac{t a_m^2}{4} \left[ (b_m - x_m)^2 - x_m^2 \right] = 25,387 \text{ cm}^5$$

$$j = \frac{1}{2I_y} (\beta_w + \beta_f + \beta_t) + x_0 = 6,06 \text{ cm}$$

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção para barras sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria é dado por

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

## Dimensionamento de barras sob flexão

Como o momento fletor causa flexão no mesmo lado do centro de torção tem-se que  $C_s = +1,0$ . Nesse exemplo adotou-se  $C_m = 1,0$ .

As forças axiais críticas de flambagem global elástica em relação ao eixo de simetria X e por torção,  $N_{ex}$  e  $N_{ez}$ , são dadas por:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 20000 \cdot 44,15}{(400)^2} = 54,47 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E I_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] =$$

$$= \frac{1}{6,19^2} \left[ \frac{\pi^2 20000 \cdot 246,61}{(400)^2} + 7700 \cdot 0,013 \right] = 10,55 \text{ kN}$$

$$M_e = \frac{1,54,47}{1,0} \left[ 6,06 + 1 \sqrt{6,06^2 + 6,19^2 \left( \frac{10,55}{54,47} \right)} \right] =$$

$$= 692,0 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5}$$

$W_c$  é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida, dado por:

$$W_c = \frac{I_y}{x_g} = \frac{10,12}{1,79} = 5,65 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_0 = \left( \frac{5,65 \cdot 25}{692,0} \right)^{0,5} = 0,452$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$  o fator de redução devido à instabilidade lateral à torção  $\chi_{FLT} = 1,0$ . Assim, o momento resistente de cálculo devido à instabilidade lateral com torção é igual ao momento resistente de cálculo no início do escoamento.

Logo o momento resistente de cálculo desse perfil é 67,3 kN.cm.

## 7.4 – Força Cortante

Uma chapa de aço (alma) sob cisalhamento também está sujeita ao fenômeno da instabilidade local. A força cortante resistente em função da esbelteza da alma ( $h/t$ ) é dada pela equação 7.17.

$$V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma} \quad \text{para } h/t \leq 1,08 \left( \frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 (E k_v f_y)^{0,5}}{\gamma} \quad \text{para } 1,08 \left( \frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5} < h/t \leq 1,4 \left( \frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3}{h \gamma} \quad \text{para } h/t > 1,4 \left( \frac{E k_v}{f_y} \right)^{0,5}$$

(eq. 7.17)

onde E é o módulo de elasticidade do aço, t é a espessura da alma, h é a largura da alma (altura da parte plana da alma),  $\gamma = 1,1$  e  $k_v$  é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado pela equação 7.18.

$$k_v = 5,0 + \frac{5,0}{(a/h)^2} \quad \text{para } a/h \leq 3,0 \quad \text{(eq. 7.18)}$$

$$k_v = 5,0 \quad \text{para } a/h > 3,0$$

onde a é a distância entre enrijecedores transversais de alma. Para alma sem enrijecedores transversais  $k_v = 5,0$ .

Os enrijecedores transversais para força cortante não devem ter a relação  $a/h$  superior a 3,0 e nem  $[260/(h/t)]^2$ . Além disso, o momento de inercia  $I_s$  de um enrijecedor simples ou duplo, em relação ao eixo contido no plano médio da alma, não deve ser inferior a  $I_{s,min}$ , dado pela equação 7.19:

$$I_{s,min} = 5 h t^3 \left( \frac{h}{a} - 0,7 \frac{a}{h} \right) \geq \left( \frac{h}{50} \right)^4 \quad \text{(eq. 7.19)}$$

Para seções com duas ou mais almas, cada alma deve ser analisada como um elemento separado resistindo à sua parcela de força cortante.

## 7.5 – Momento Fletor e Força Cortante Combinados

Em peças sujeitas a momento fletor e força cortante (em todas as barras com carregamento transversal aplicado) o efeito combinado deve ser verificado.

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo na mesma seção, devem satisfazer a expressão de interação 7.20:

$$(M_{Sd} / M_{0,Rd})^2 + (V_{Sd} / V_{Rd})^2 \leq 1,0 \quad (\text{eq. 7.20})$$

onde  $M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo,  $M_{0,Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo pelo escoamento da seção efetiva, conforme o item 7.1,  $V_{Sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo e  $V_{Rd}$  é força cortante resistente de cálculo conforme o item 7.4.

Para barras com enrijecedores transversais de alma, além de serem atendidas as exigências do item 7.1 e 7.4 deste manual, quando  $M_{Sd}/M_{0,Rd} > 0,5$  e  $V_{Sd}/V_{Rd} > 0,7$  deve ser satisfeita a expressão de interação 7.21:

$$0,6(M_{Sd} / M_{0,Rd}) + (V_{Sd} / V_{Rd}) \leq 1,3 \quad (\text{eq. 7.21})$$

**Exemplo 09** – Verificação quanto ao cisalhamento do perfil do exemplo 07 para uma força concentrada de cálculo no meio do vão da viga biapoada no valor de 1,5 kN ( $U_e$  100×50×17×1,2;  $L=400$  cm).

Solicitações na barra:

$$M_{Sd} = \frac{P.L}{4} = \frac{1,5.400}{4} = 150 \text{ kN.cm}$$

$$V_{Sd} = \frac{P}{2} = 0,75 \text{ kN}$$

$M_{0,Rd} = 195,45 \text{ kN.cm}$  – Momento resistente pelo escoamento das fibras mais solicitadas (exemplo 07 item i).

Cálculo do esforço cortante resistente:

$$h = b_w - 2t - 2r_i = 100 - 2.1,2 - 2.1,2 = 95,2 \text{ mm}$$

$$= 9,52 \text{ cm (altura da parte plana da alma)}$$

$$t = 0,12 \text{ cm} \quad k_v = 5,0 \quad h/t = 79,33$$

$$1,08 \left( \frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5} = 1,08 \left( \frac{20000.5}{25} \right)^{0,5} = 68,3$$

$$1,4 \left( \frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5} = 1,4 \left( \frac{20000.5}{25} \right)^{0,5} = 88,5$$

$$\text{Como } 1,08 \left( \frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5} < h/t \leq 1,4 \left( \frac{Ek_v}{f_y} \right)^{0,5}, \text{ tem-se:}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65t^2 (Ek_v f_y)^{0,5}}{\gamma} =$$

$$= \frac{0,65.0,12^2 (20000.5.25)^{0,5}}{1,1} = 13,45 \text{ kN}$$

Verificação do efeito combinado momento fletor e esforço cortante:

$$(M_{Sd} / M_{0,Rd})^2 + (V_{Sd} / V_{Rd})^2 \leq 1,0$$

$$(150 / 195,45)^2 + (0,75 / 13,45)^2 \leq 1,0$$

$$0,589 + 0,003 = 0,592 \leq 1,0 - \text{Verificado!}$$



# ***Capítulo 8***

---

Dimensionamento de  
Barras Submetidas à  
Flexão Composta

## Dimensionamento de barras submetidas à flexão composta

Os esforços solicitantes da estrutura devem ser obtidos por meio de modelos matemáticos realistas, que permitam representar o comportamento da estrutura e dos materiais estruturais, levando-se em conta todas as deformações causadas por todos os esforços solicitantes relevantes. Da mesma forma que nas estruturas compostas por perfis laminados ou soldados, esses esforços devem ser analisados considerando-se a não linearidade geométrica do material, conforme o caso. Em casos especiais, pode ser necessário considerar a interação solo-estrutura e o comportamento das ligações na análise estrutural. Não é objeto deste manual discorrer-se sobre análise estrutural.

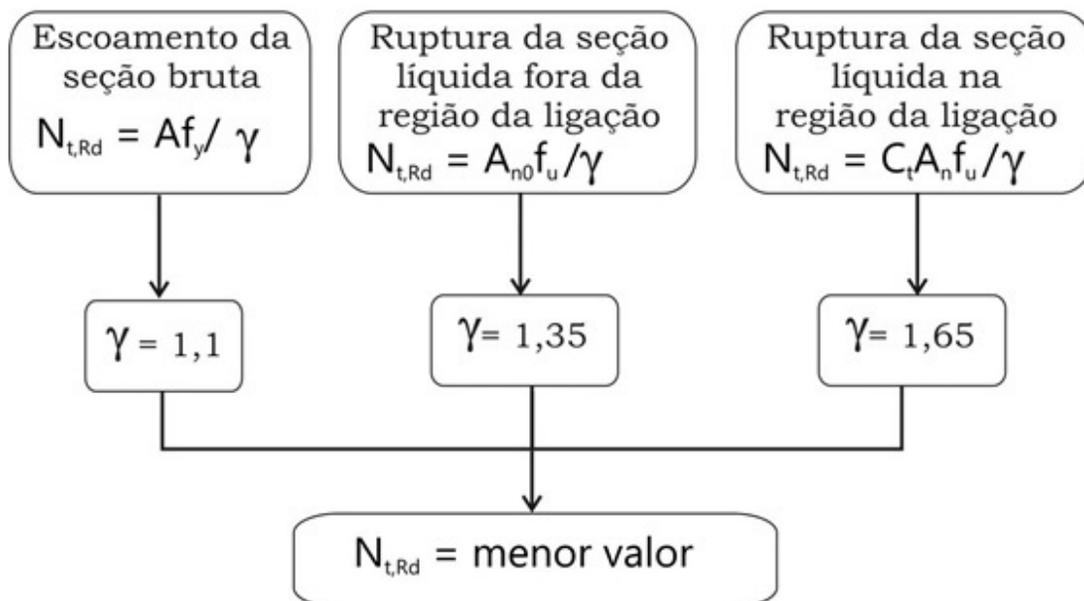
Após a análise estrutural, a força axial solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem satisfazer a equação de interação 8.1,

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{eq. 8.1})$$

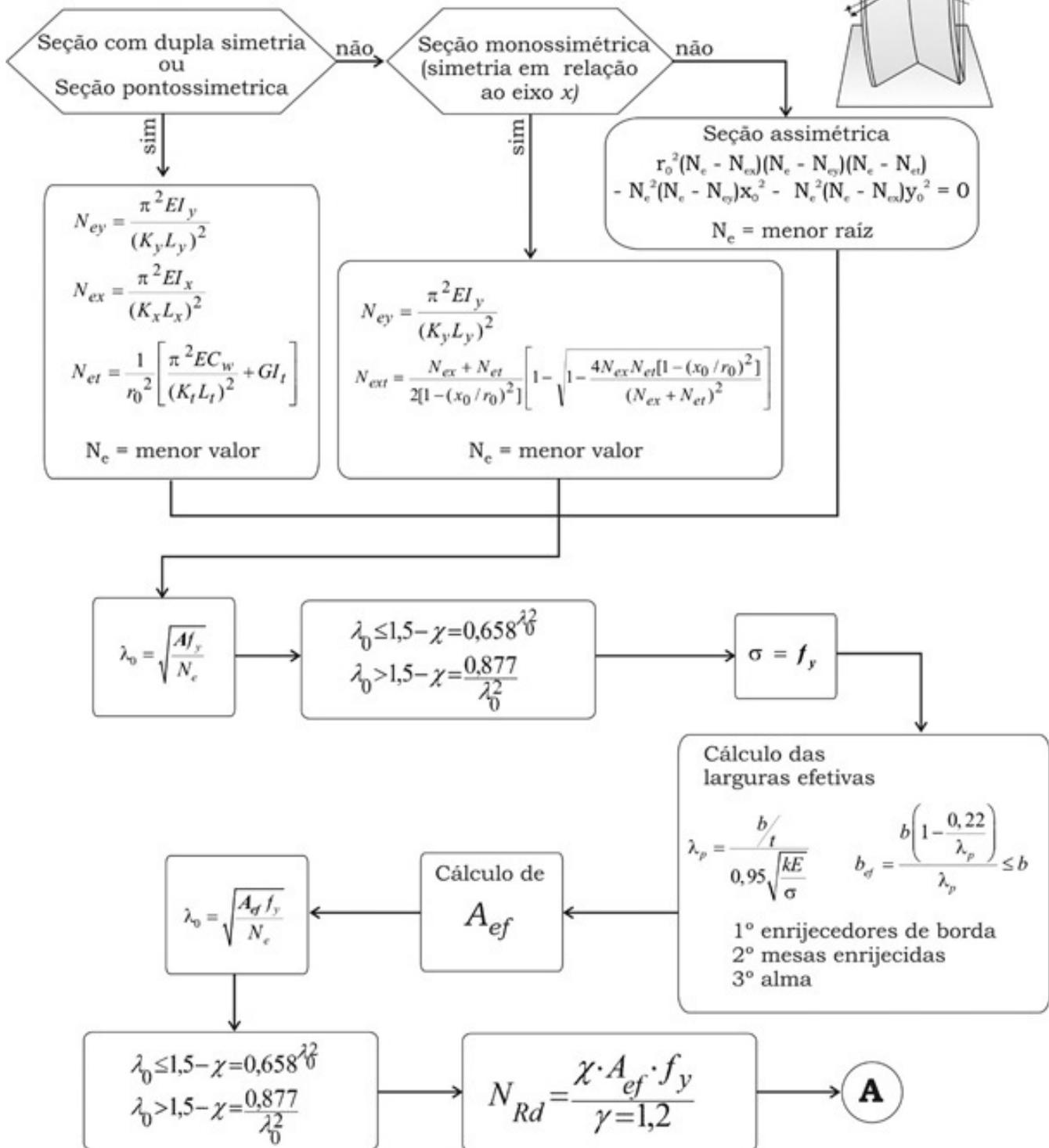
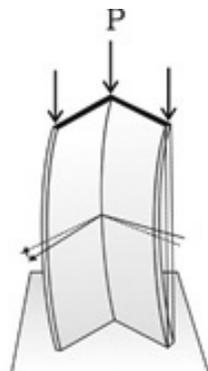
onde  $N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão ou de tração solicitante de cálculo, considerada constante na barra,  $M_{x,Sd}$  e  $M_{y,Sd}$  são os momentos fletores solicitantes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente,  $N_{c,Rd}$  é a força axial de tração ou de compressão resistente de cálculo, obtidas conforme os capítulos 5 e 6 deste manual, respectivamente,  $M_{x,Rd}$  e  $M_{y,Rd}$  são os momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados conforme o capítulo 7 deste manual.

A seguir apresentam-se fluxogramas orientativos para o dimensionamento de perfis formados a frio.

### Barras submetidas à tração

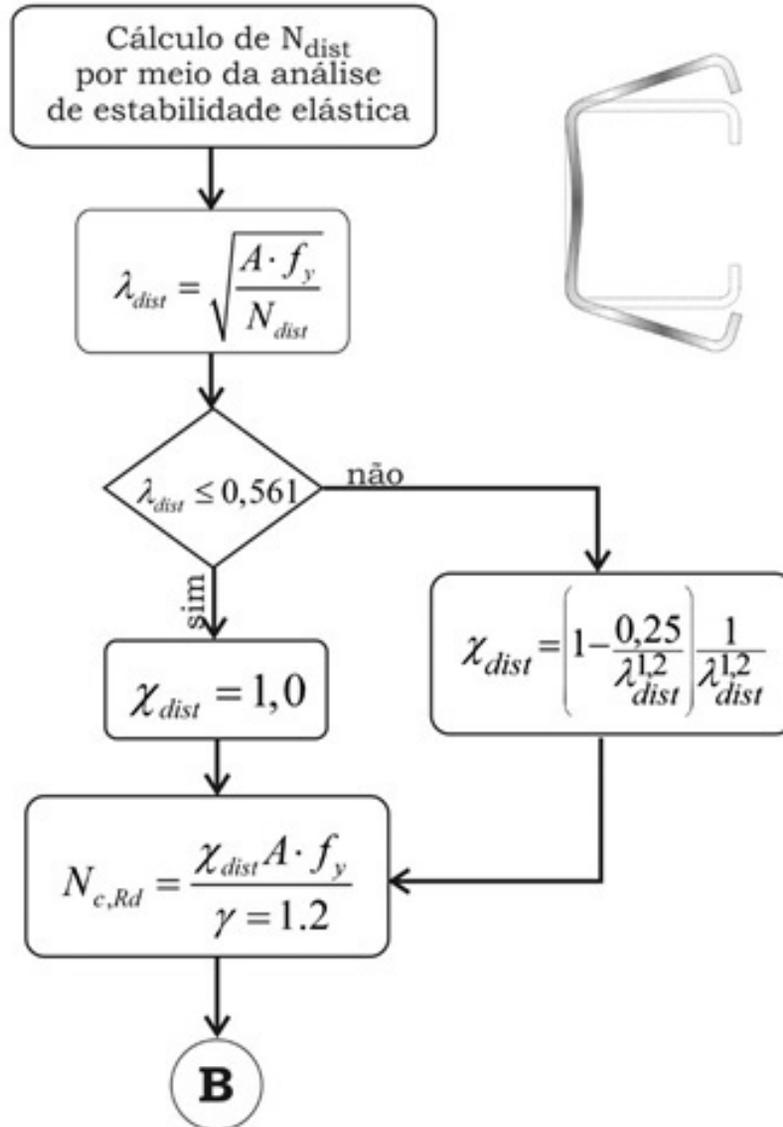


**Barras submetidas à Compressão**  
**Instabilidade por flexão, torção ou flexotorção**

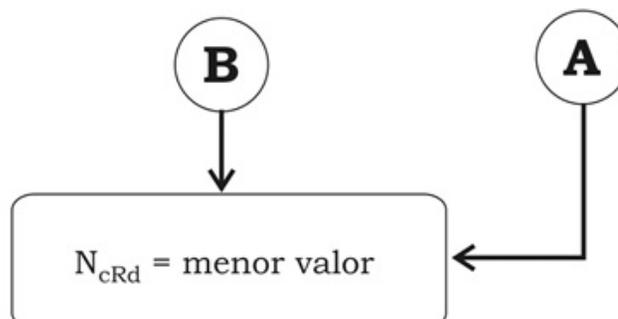


### Barras submetidas à Compressão

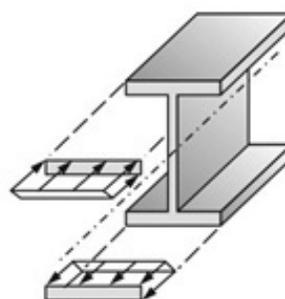
Instabilidade por distorção da seção transversal



Força Resistente à Compressão



**Barras submetidas ao momento fletor**  
**Escoamento da seção efetiva**

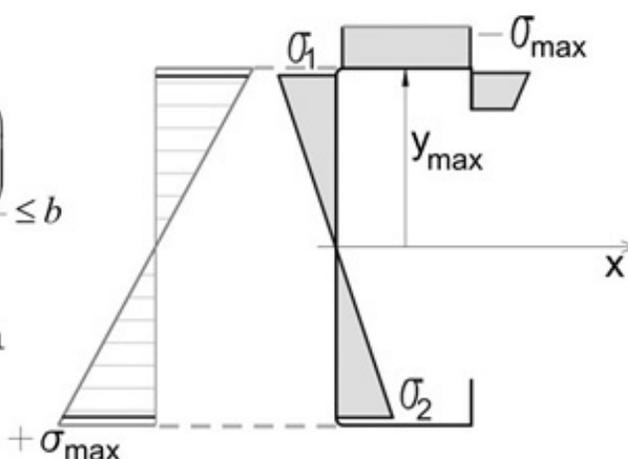


$$\sigma = f_y$$

Cálculo das larguras efetivas

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{kE/\sigma}} \quad b_{ef} = \frac{b \left( 1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \leq b$$

- 1º enrijecedores de borda
- 2º mesas enrijecidas
- 3º alma



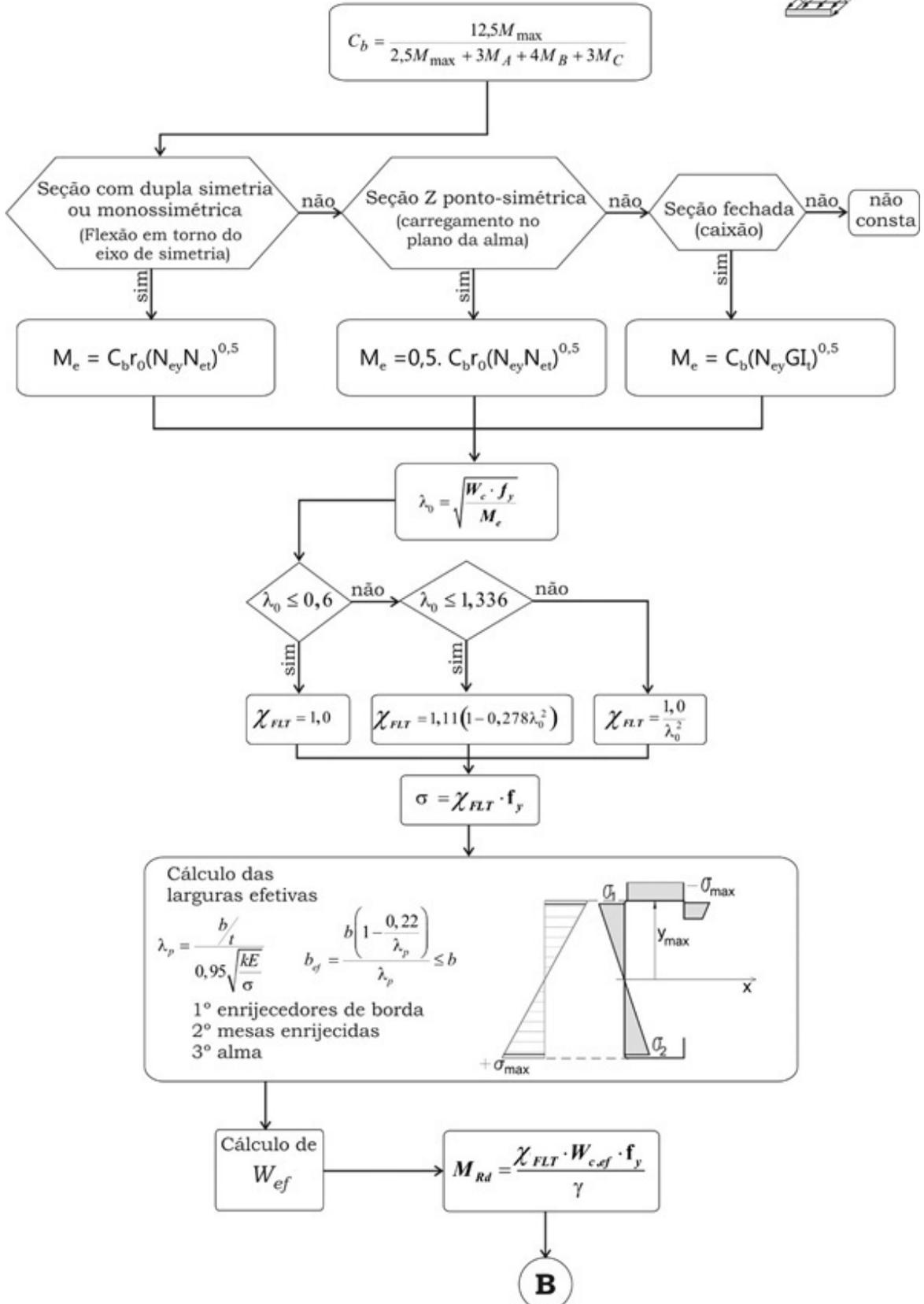
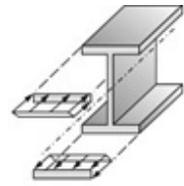
Cálculo de  $W_{ef}$

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma}$$

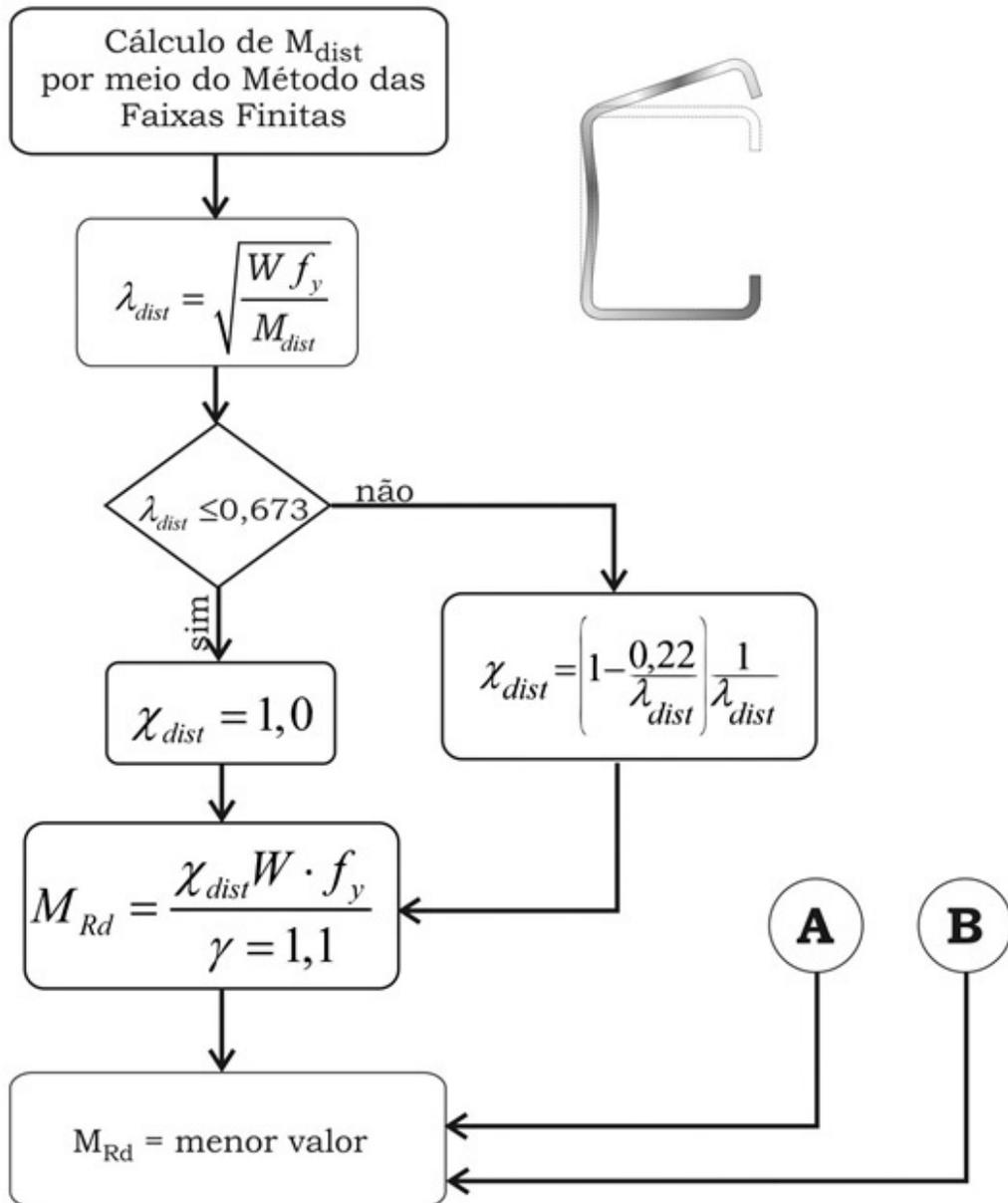
**A**

# Dimensionamento de barras submetidas à flexão composta

## Barras submetidas ao momento fletor Instabilidade lateral com torção



**Barras submetidas à Flexão**  
**Instabilidade por distorção da seção transversal**



**Flexão Composta**

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$



***Referências***

---

***Bibliográficas***

## Referências bibliográficas

---

ÁDÁNY, S. e SCHAFER, B.W. Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: application and examples. *Thin-walled Structures*. v. 44, p. 585-600, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro. 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio. Rio de Janeiro. 2010.

PIERIN; I. A instabilidade de perfis formados a frio em situação de incêndio. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2011.

PIERIN; I., SILVA; V. P. e ROVERE; H. L. Forças Normais e Momentos Fletores Críticos de Perfis Formados a Frio. *Revista da Estruturas de Aço*. v. 2. n.1. Rio de Janeiro, 2013.

PROLA, L.C. Estabilidade local e global de elementos estruturais de aço enformados a frio. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2001.

SILVA; E. L. Sobre o dimensionamento de perfis formados a frio. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2006.

SILVA; V. P. e PANNONI; F. D. Estrutura de aço para edifícios. Ed. Blucher 2010

---

# ***Anexo A***

---

## Torção em Perfis de Seção Aberta

## Anexo A - Torção em perfis de seção aberta

### A.1 – Carregamentos Transversais fora do Centro de Torção

A Figura A.1 mostra uma seção Ue, monossimétrica, submetida a um esforço cortante  $V$  cuja linha de ação não passa pelo centro de torção. As forças  $v_1, v_2, \dots, v_5$  representam as resultantes das tensões de cisalhamento atuantes nos elementos de chapa da seção. Notam-se pela figura dois pontos importantes:

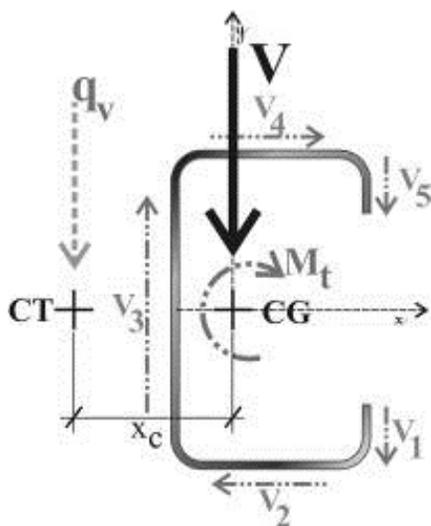


Figura A.1 – Seção aberta com força cortante fora do CT

1. Fazendo o equilíbrio das forças verticais, nota-se que o esforço cortante na alma do perfil, ( $v_3$ ), é maior que o esforço cortante atuante na seção ( $V$ ):

$$-V + v_3 - v_5 - v_1 = 0 \rightarrow v_3 = V + v_1 + v_5$$

Como na verificação ao esforço cortante nos perfis formados a frio admite-se que todo o esforço cortante é absorvido pela alma é importante notar que esforço a ser resistido pela alma deve ser maior que a cortante atuante na seção:  $V_{Rd} \geq v_3$  (onde  $V_{Rd}$  é o esforço cortante resistente da alma do perfil).

2. Fazendo o equilíbrio do momento das forças no plano da seção, constata-se a existência de um momento de torção ( $M_t$ ) agindo na seção transversal. É possível notar pela Figura

A.1 que, em relação a um ponto arbitrário, o momento de torção resultante é diferente de zero:

$$M_t = \sum F \cdot d = v_1 \cdot d_1 + \dots + v_5 \cdot d_5 + V \cdot d \neq 0,$$

em que “ $d_i$ ” são as distâncias entre a linha de aplicação das cortantes “ $v_i$ ” e o ponto considerado.

Porém, é intuitivo pensar que existe um ponto no plano da seção, em que, se as forças transversais externas forem nele aplicadas não ocorrerá torção na seção, pois o momento de torção resultante das forças de cisalhamento ( $V_1 \cdot d_1, \dots, V_5 \cdot d_5$ ) será igual em módulo mas com sentido contrário ao momento de torção causado pelo carregamento externo. Esse ponto existe e é definido, na teoria de flexão, como o centro de torção (CT). Isso ocorre quando o carregamento é aplicado numa linha que passa pelo CT da seção (distante  $x_c$  do centro geométrico),  $q_v$  da Figura A.1.

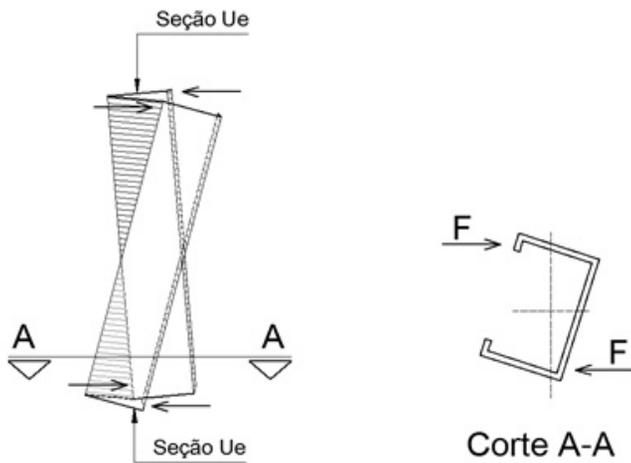
Assim, se o carregamento aplicado em uma viga não passar pelo centro de torção da seção transversal, a viga estará submetida à torção.

Observação: CT, centro de torção, é o centro de rotação da seção quando está submetida somente à torção. Nos perfis de seção aberta de paredes esbeltas, o centro de torção (CT) coincide com o centro de cisalhamento da seção. No caso particular de seção com um eixo de simetria, o CT encontra-se sobre esse eixo. Nas seções duplamente simétricas o centro de torção coincide com o centro geométrico da seção, como são os casos dos perfis tipo I simétricos.

### A.2 - Torção

A torção uniforme é caracterizada por causar na seção transversal um estado de tensões de cisalhamento puro. Ocorre apenas torção uniforme, quando não há qualquer restrição ao livre empenamento na direção longitudinal, como é o caso da Figura A.2. É possível notar, no desenho em corte do perfil que, ao

se aplicar um esforço de torção (nesse caso, por meio do binário de força,  $F$ ), não havendo nenhum impedimento na seção transversal que a impeça de se deslocar na direção longitudinal da barra, ocorrerão deslocamentos longitudinais de pontos da seção transversal nessa direção. Esses deslocamentos não são iguais em todos os pontos da seção, ou seja, a seção não permanecerá plana.



Barra em perfil "Ue" vista em planta após a deformação na seção transversal devido às forças mostradas no Corte A-A

Figura A.2 – Empenamento na torção uniforme

Quando há restrição ao livre empenamento, ocorre a torção não uniforme. A torção não uniforme causa na seção transversal tensões normais de tração e compressão (que podem ser vistas como momentos fletores aplicados em determinadas regiões da seção) e tensões de cisalhamento.

O efeito do momento de torção ( $M_t$ ) aplicado numa barra, portanto, deve ser considerado em duas parcelas: a primeira se refere à torção de Saint Venant  $M_z$ , ou simplesmente torção uniforme, e a segunda ao efeito da restrição ao empenamento, sendo denominada de torção com flexão  $T_\omega$ , ou simplesmente torção não uniforme. Assim, tem-se a equação A.1.

$$M_t = M_z + T_\omega \quad (\text{eq. A.1})$$

### A.2.1 - Torção Uniforme

As tensões de cisalhamento de um perfil de seção aberta submetido à torção uniforme (sem restrição ao empenamento) têm distribuição linear ao longo da espessura do perfil, como mostra o detalhe da Figura A.3.

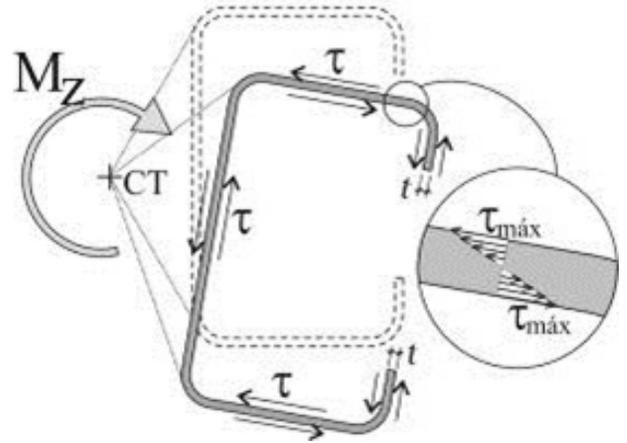


Figura A.3 – Tensões de cisalhamento na torção uniforme

O valor da máxima tensão de cisalhamento,  $\tau_{m\acute{a}x}$ , numa seção submetida ao esforço de torção uniforme,  $M_z$ , pela teoria da torção uniforme (teoria de Saint-Venant) é dado pela equação A.2.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{M_z t}{I_t} \quad (\text{eq. A.2})$$

onde,  $I_t$  é o momento de inércia à torção da seção transversal. Para perfis de seção aberta e paredes finas, o momento de inércia à torção é obtido pela equação A.3.

$$I_t = \sum \frac{b_i t^3}{3} \quad (\text{eq. A.3})$$

onde  $b_i$  são os comprimentos dos elementos da seção e  $t$  é a espessura.

O valor da rigidez a torção é dado por  $G \cdot I_t$ , onde  $G$  é o módulo de elasticidade transversal do qual a barra é formada. Para o aço, tem-se  $G = 7.700 \text{ kN/cm}^2$ .

### A.2.2 Torção não uniforme

O empenamento de uma seção corres-

## Anexo A - Torção em perfis de seção aberta

ponde a deslocamentos que ocorrem fora do seu plano ao ser submetida à torção (ver a figura A.2). A presença do empenamento em uma barra invalida as simplificações adotadas na resistência dos materiais, dentre as quais a hipótese das seções permanecerem planas na configuração deformada da barra. A **restrição ao empenamento**, ou seja, impedir que ocorram deslocamentos fora do plano de uma seção, implica no surgimento de tensões normais e de cisalhamento na seção transversal. Os efeitos da restrição ao empenamento devem ser considerados tanto na análise de tensões quanto na avaliação da instabilidade da barra.

A Figura A.2 mostra um perfil Ue sob efeito de torção uniforme (sem restrição ao empenamento) provocada pela aplicação direta de um momento de torção. Não há restrições a deslocamentos nas extremidades dessa barra, podendo se deformar livremente. Nesse caso, percebem-se na configuração deformada da barra, deslocamentos fora do plano das seções, configurando o empenamento da seção.

Na Figura A.4a, no entanto, a barra está com uma das extremidades engastada. Nesse caso, o impedimento ao empenamento em uma extremidade induz à flexão das mesas em seu próprio plano, o que conduzirá a tensões normais e de cisalhamento nas mesas. Esse tipo de sollicitação origina na barra uma configuração de esforços internos que não podem ser representados pelos esforços internos clássicos (esforço normal, momento fletor, cortante e torção).

A Figura A.4b apresenta o mesmo perfil da Figura A.4a separado em duas partes, substituindo-se a sollicitação externa original,  $M_t$ , por um par de momentos,  $M$ , aplicados nos planos das mesas do perfil. Esse par de momentos reproduz a configuração original gerada pelo momento  $M_t$ .

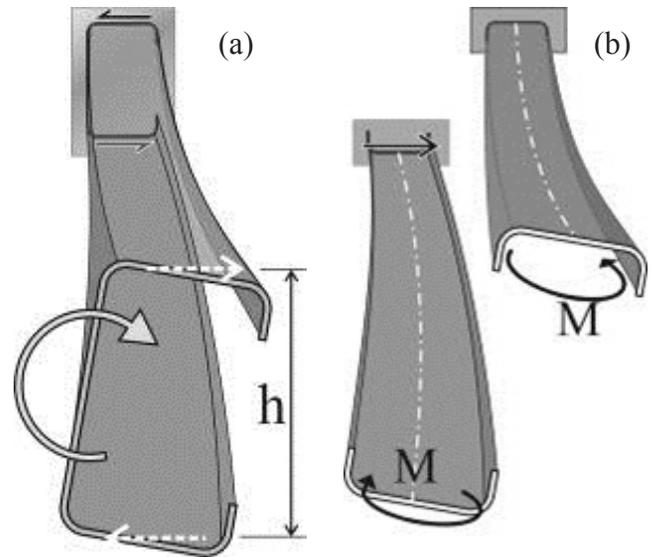


Figura A.4 – Torção não uniforme (a) e bímomento (b)

As tensões normais e de cisalhamento existentes na seção transversal, decorrentes da restrição ao empenamento, são similares às tensões oriundas do par de momentos fletores  $M$ , aplicados nos planos das mesas do perfil. Esse par de momentos fletores multiplicado pela distância entre eles é denominado de bímomento,  $M_\omega = M.h$ . Ao bímomento estão associadas tensões de cisalhamento agindo nos elementos de chapa do perfil. A somatória dos momentos, no plano da seção, devido às resultantes das tensões de cisalhamento,  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$ , (ver a Figura A.5) resulta em um momento de torção,  $T_\omega$ , denominado de torção com flexão, que corresponde exatamente à parcela do esforço de torção aplicado,  $M_t$ , que é resistido pela restrição ao empenamento da seção. O esforço de torção com flexão ao longo da barra (também chamado de torção não uniforme),  $T_\omega$ , tem o valor da derivada do bímomento ao longo da barra,  $M_\omega$ , com o sinal oposto, equação A.4.

$$T_\omega = -M'_\omega \quad (\text{eq. A.4})$$

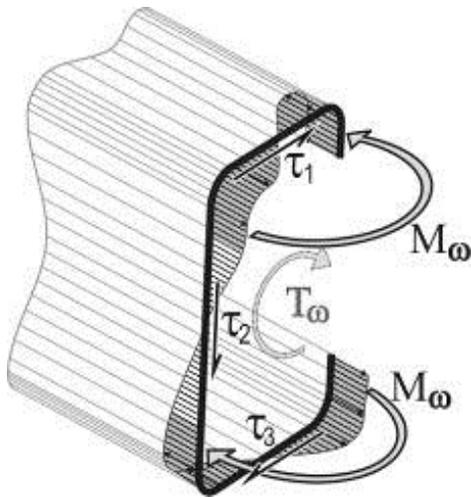


Figura A.5 – Tensões na torção não uniforme

A distribuição das tensões normais da seção transversal devido à restrição ao empenamento assemelha-se ao mostrado na Figura A.5. Nota-se que as tensões de tração e compressão na seção, realmente comportam-se como se houvesse momentos fletores de sentido opostos agindo nas mesas do perfil e as tensões de cisalhamento são correspondentes a essas tensões normais. Os deslocamentos normais ao plano da seção transversal acompanham a distribuição de tensões da Figura A.5. A resultante das tensões normais, nesse caso é nula, e por isso não acarreta nenhum esforço normal adicional na seção transversal. A resultante das tensões de cisalhamento é o momento de torção  $T_\omega$ .

O empenamento na seção transversal não ocorre somente quando submetida a momento de torção, mas também, quando a seção é submetida a forças fora do seu plano. A Figura A.6 procura mostrar de forma intuitiva o empenamento na seção Ue quando submetida a uma força de tração (T) localizada próximo ao vértice do perfil.

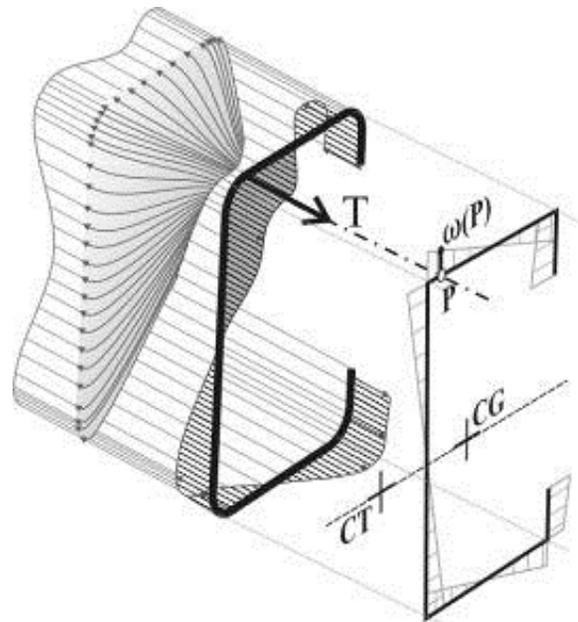


Figura A.6 – Empenamento na tração

Parte das tensões provocadas pela força T será distribuída na mesa superior e parte irá para a alma do perfil. As excentricidades da força em relação a ambas conduzem à ocorrência de momentos fletores nos planos da mesa e alma da seção, similares ao caso da torção aplicada ao perfil, configurando o empenamento da seção. Note que, algo similar ocorre, com sinal trocado, quando a força for de compressão, nesse caso, acoplando-se aos fenômenos de instabilidade.

O valor do bimomento, ( $M_\omega$ ), causado pela aplicação de uma força na direção longitudinal (ver a Figura A.6), na seção onde a força é aplicada, é obtido pela equação A.5.

$$M_\omega = T \cdot \omega(P) \quad (\text{eq. A.5})$$

onde  $\omega(P)$  é o valor da área setorial da seção no ponto de aplicação da força T. Uma explicação geral sobre a área setorial pode ser vista no item A.3.

Também nesse caso, de aplicação de força longitudinal excêntrica, há esforços internos de torção induzidos pelas tensões cisalhantes resultante da restrição ao empenamento ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ , da Figura A.5). O valor desse momento de torção não uniforme,  $T_\omega$ , é determinado pela

## Anexo A - Torção em perfis de seção aberta

equação A.4. Em vista de o momento externo ser nulo, o momento de torção não uniforme é equilibrado por um momento de torção uniforme na seção,  $M_z$ , como mostram as equações A.6 e A.7.

$$M_t = M_z + T_\omega = 0 \quad (\text{eq. A.6})$$

$$M_z = -T_\omega \quad (\text{eq. A.7})$$

Para calcular os efeitos do empenamento na seção transversal necessita-se das chamadas propriedades setoriais da seção,  $\omega$ ,  $S_\omega$  e  $I_\omega$ . Uma explanação geral de como obter essas propriedades é mostrada no item A.3.

As expressões completas das tensões que atuam numa seção transversal, levando-se em conta os efeitos do empenamento, são mostradas nas equações A.8 e A.9.

$$\sigma = \frac{N}{A} - \frac{I_x M_y - I_{xy} M_x}{I_x I_y - I_{xy}^2} x + \frac{I_y M_x - I_{xy} M_y}{I_x I_y - I_{xy}^2} y + \frac{M_\omega}{I_\omega} \omega \quad (\text{eq. A.8})$$

$$\tau_x = \frac{1}{t} \left[ \frac{V_y I_{xy} + V_x I_x}{I_x I_y - I_{xy}^2} S_y(s) - \frac{V_x I_{xy} + V_y I_y}{I_x I_y - I_{xy}^2} S_x(s) \right] + \frac{T_\omega}{I_\omega t} S_\omega(s) \quad (\text{eq. A.9})$$

Como pode ser visto na equação A.8, diferentemente da teoria da Resistência dos Materiais, a última parcela corresponde ao efeito da restrição ao empenamento. A distribuição dessa parcela das tensões normais, na seção transversal, portanto, é análoga à da área setorial  $\omega_{(s)}$  (ver a Figura A.6).

Da mesma forma, nota-se na equação A.9, também, uma parcela adicional, em relação à da teoria da Resistência dos Materiais. A distribuição dessa parcela das tensões de cisalhamento, na seção transversal, é análoga à do momento estático setorial,  $S_\omega$  (cuja definição é mostrada mais adiante). As tensões de cisalhamento da equação A.9 são constantes na

espessura do perfil, ou seja, não consta nessa equação a parcela de tensões oriundas da torção uniforme. A tensão de cisalhamento total é determinada adicionando-se o valor obtido da equação A.9 ao da equação A.2.

### A3 - Propriedades setoriais

Para calcular os efeitos do empenamento na seção transversal necessita-se das chamadas propriedades setoriais da seção. São propriedades geométricas definidas por Vlasov na teoria de torção não uniforme. Pode ser feita uma analogia entre as propriedades setoriais (área setorial,  $\omega$ , momento estático setorial,  $S_\omega$  e momento de inércia setorial,  $I_\omega$ ) e as propriedades das figuras planas (área,  $A$ , momento estático,  $S$  e momento de inércia à flexão,  $I$ ). Não é objetivo deste texto detalhar o cálculo das propriedades setoriais, mas, para um entendimento geral, serão apresentadas as equações que as definem e as equações das propriedades setoriais das principais seções transversais.

A área setorial é definida pela equação A.10.

$$\omega_{(s)}^{CT} = \int_0^s -r_n ds \quad (\text{eq. A.10})$$

onde  $\omega_{(s)}^e$

é chamada de área setorial do ponto  $s$  em relação ao pólo CT e a origem  $O$ , em que  $s$  e  $r_n$  são vetores com sentido e direção conforme mostrados na Figura A.7. É usual representar  $\omega_{(s)}$  por um diagrama traçado sobre a linha média da seção transversal, com o valor de  $\omega$  indicado na direção normal ao contorno, como mostrado nas Figuras A.7 e A.8.

O momento estático setorial no ponto  $s$ , definido na equação A.11, é a área sob o diagrama da área setorial no intervalo entre o ponto  $s$  e a origem  $s_0$  multiplicada pela espessura  $t$ , conforme mostra a Figura A.7. A origem  $s_0$  deve ser um ponto em que  $S_\omega$  é igual a zero, pode-se tomar as extremidades do perfil onde o momento estático setorial é sempre zero.

$$S_{\omega}(s) = \int_{s_0}^s \omega \cdot t ds \quad (\text{eq. A.11})$$

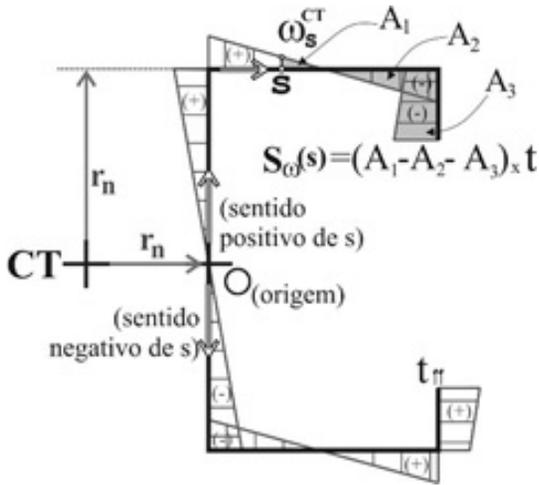


Figura A.7 – Propriedades setoriais

O momento de inércia setorial,  $I_{\omega}$ , é definido pela equação A.12 e é também chamado de constante de empenamento da seção transversal. A rigidez da seção transversal ao empenamento é definida pelo produto  $E \cdot I_{\omega}$ .

$$I_{\omega} = \int_A \omega^2 dA \quad (\text{eq. A.12})$$

A seguir mostram-se os valores da área setorial,  $\omega$ , dos principais perfis formados a frio:

Seção Ue e U:

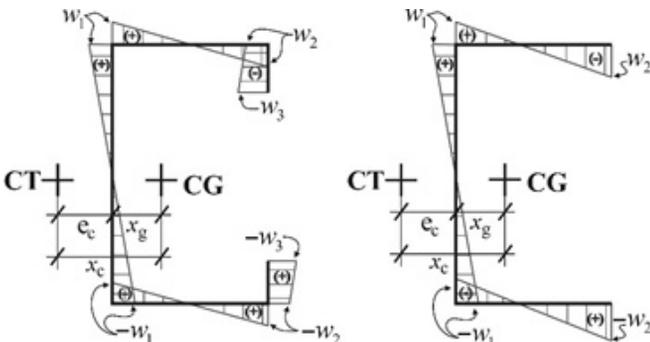


Figura A.8 – Área setorial de seções Ue e U

$$w_1 = \frac{e_c b_w}{2} \quad (\text{eq. A.13})$$

$$w_2 = w_1 - \frac{b_w b_f}{2} \quad (\text{eq. A.14})$$

$$w_3 = w_2 - (e_c + b_f) D \quad (\text{eq. A.15})$$

$$e_c = x_c - x_g \quad (\text{eq. A.16})$$

Seção Z:

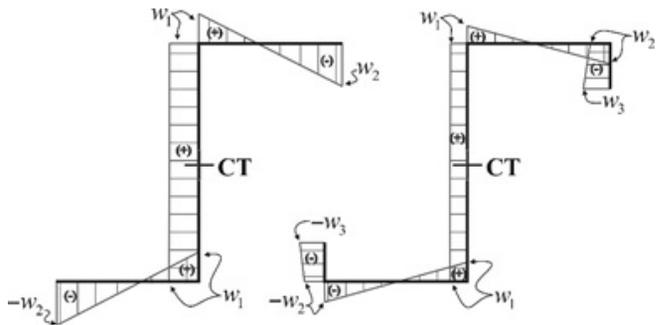


Figura A.9 – Área setorial de seções Z e Z<sub>90</sub>

$$w_1 = \frac{b_w b_f^2 t}{2A} \quad (\text{eq. A.17})$$

$$w_2 = w_1 - \frac{b_w b_f}{2} \quad (\text{eq. A.18})$$

Seção Z<sub>90</sub>:

$$w_1 = \frac{b_f t}{A} \left( \frac{b_w b_f}{2} + b_w D + D^2 \right) \quad (\text{eq. A.19})$$

$$w_2 = w_1 - \frac{b_f b_w}{2} \quad (\text{eq. A.20})$$

$$w_3 = w_2 - b_f D \quad (\text{eq. A.21})$$

Seção L:

Nos perfis tipo L não existe empenamento. Nesse caso há apenas torção uniforme quando submetido a esforços de torção (Figura A.10).

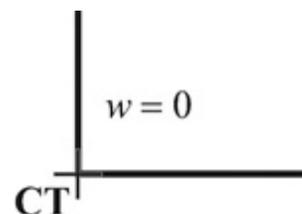


Figura A.10 - Seção L

## Anexo A - Torção em perfis de seção aberta

$$w = 0 \quad (\text{eq. A.22})$$

Para os perfis U, Ue, Cr, Z90 e Z45, os valores de  $I_w$  podem ser encontrados nas tabelas da ABNT NBR 6355:2012 para os perfis padronizados ou utilizando-se das equações apresentadas na mesma norma para os perfis não padronizados.

No caso de perfil Z simples (não enrijecido) o valor de  $I_w$  pode ser calculado utilizando-se as equações A.17 e A.18 introduzindo-as na equação de definição, A.12, como mostra a equação A.23.

$$I_w = \int_A \omega^2 dA = \int_{\text{alma}} \omega_1^2 dA + 2 \int_{\text{mesa}} \omega_1^2 dA_1 + 2 \int_{\text{mesa}} \omega_2^2 dA_2 \quad (\text{eq. A.23})$$

onde A1 representa o trecho positivo e A2 o trecho negativo da área setorial nas mesas, conforme mostra a Figura A.11.

Resolvendo as integrais da equação A.23, obtém-se a expressão A.24.

$$I_w = \omega_1^2 b_w t + 2 \left( \frac{\omega_1}{b_1} \right)^2 \frac{b_1^3}{3} + 2 \left( \frac{\omega_2}{b_2} \right)^2 \frac{b_2^3}{3} \quad (\text{eq. A.24})$$

onde  $b_1$  e  $b_2$  são obtidos pelas equações A.25 e A.26, respectivamente,

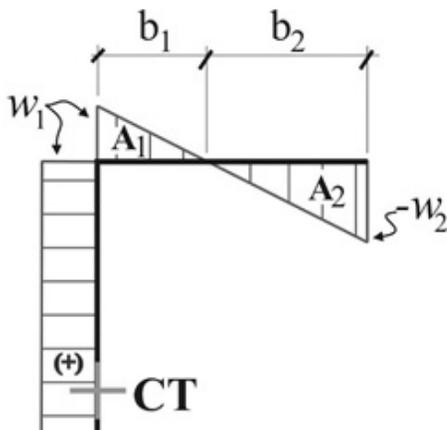


Figura A.11 – Áreas setoriais

$$b_1 = \frac{|\omega_1|}{|\omega_1| + |\omega_2|} b f \quad (\text{eq. A.25})$$

$$b_2 = \frac{|\omega_2|}{|\omega_1| + |\omega_2|} b f \quad (\text{eq. A.26})$$

$\omega_1$  e  $\omega_2$  são dados nas equações A.17 e A.18 respectivamente

**Exemplo A.1** - Determinar as máximas tensões de tração e de compressão, na seção onde é aplicado a força, de um tirante constituído de perfil tipo Z 200×50×3,00, submetido a uma força concentrada de tração, no centro geométrico, no valor de 100 kN.

Resolução:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_\omega}{I_w} \omega$$

$$M_\omega = T \cdot \omega(P)$$

$$\omega(P) = \frac{b_w b_f^2 t}{2A} = \frac{20.5^2 \cdot 0,3}{2 \cdot 9} = 8,33 \text{ cm}^2$$

(Anexo A- eq. A.17)

$$M_\omega = 100 \times 8,33 = 833 \text{ kN.cm}^2$$

$$I_w = 1875 \text{ cm}^6 \text{ (Anexo A- eq. A.23)}$$

Assim,

$$\sigma = \frac{100}{9} + \frac{833}{1875} \omega$$

Tensão no CG do perfil (máxima tensão de tração)

$$\sigma = \frac{100}{9} + \frac{833}{1875} 8,33 = 11,1 + 3,7 = +14,8 \text{ kN/cm}^2$$

Tensão na extremidade do perfil (máxima tensão de compressão)

$$\omega(P) = \frac{b_w b_f^2 t}{2A} - \frac{b_w b_f}{2} = \frac{20.5^2 \cdot 0,3}{2 \cdot 9} - \frac{20.5}{2} = -41,67 \text{ cm}^2$$

(Anexo A- eq. A.18)

$$\sigma = \frac{100}{9} - \frac{833}{1875} 41,67 = 11,1 - 18,5 = -7,4 \text{ kN/cm}^2$$

Podem-se visualizar as distribuições de tensões na seção transversal no exemplo acima, onde um tirante constituído de perfil tipo Z apresenta tensões de compressão consideráveis em alguns pontos da seção pela Figura A.12. Essas tensões ocorrem na extremidade das mesas do perfil, quando a parcela das tensões de tração,  $N/A$ , for menor que a parcela das tensões devido ao empenamento, que são negativas (ou seja, de compressão).

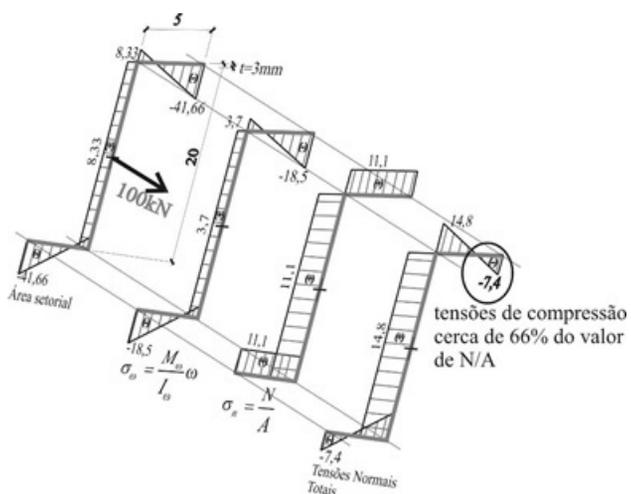


Figura A.12 – Distribuição de tensões em um perfil Z



# ***Anexo B***

---

Forças Transversais não  
Paralelas a um dos Eixos  
Principais

## Anexo B - Forças transversais não paralelas a um dos eixos principais

Nos casos em que os eixos principais não coincidem com as direções das forças aplicadas, a seção transversal do perfil ficará submetida a momentos fletores em torno dos dois eixos principais e não apenas a momento no plano do carregamento. Se o carregamento aplicado não passar pelo centro de torção (CT) a seção estará sujeita, também, a esforços de torção (vide Anexo A). No caso dos perfis tipo Z e Z com enrijecedor de borda, o centro de torção (CT) coincide com o centro geométrico (CG), não ocorrendo torção quando submetidos a forças que passem pelo CG.

Uma força transversal vertical aplicada na alma do perfil Z, não produzirá esforços de torção, porém, as resultantes das tensões de cisalhamento,  $V_1$  e  $V_3$ , nas mesas de um perfil Z submetido a uma força transversal vertical aplicada na sua alma (passando pelo CG), resultam em uma força agindo na direção  $x$ . Essa força provoca um momento fletor em torno do eixo  $y$ , como é mostrado na Figura B.1b. Então, o resultado da força vertical  $q_v$ , aplicado no CG de um perfil Z é, além do momento fletor em torno de  $x$ , deslocamento horizontal da seção ( $\Delta x$  na Figura B.1c) e momento fletor em torno do eixo  $y$ , conforme a ilustração da barra deformada mostrada na Figura B.1c.

Os efeitos das tensões de cisalhamento horizontais, responsáveis pelo momento fletor em torno do eixo  $y$ , podem ser analisados e quantificados projetando-se a força vertical,  $q_v$ , nas direções principais de inércia do perfil e estudando o comportamento do perfil (distribuição das tensões na seção e os deslocamentos na barra), a partir dos eixos principais de inércia da seção ( $x'$  e  $y'$ ).

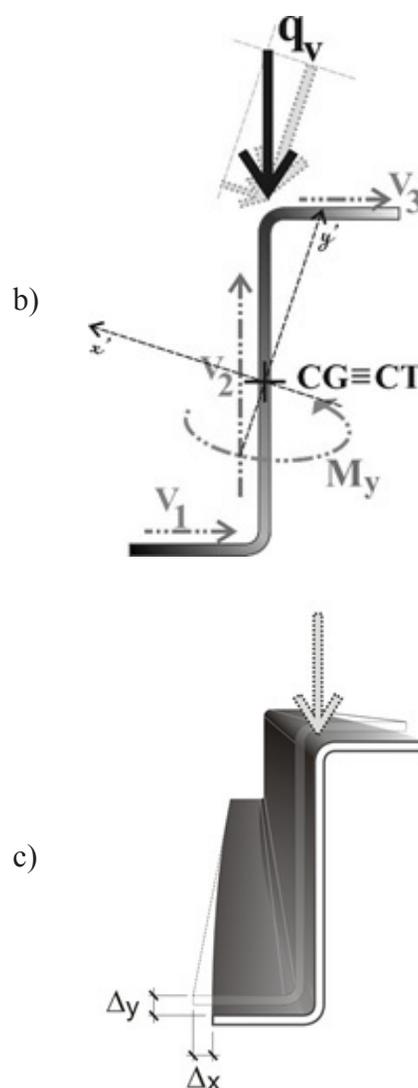
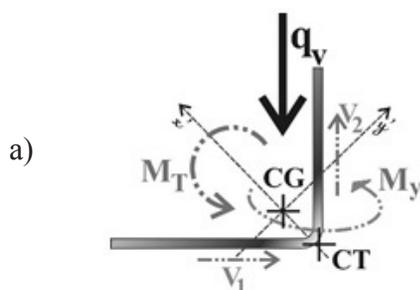


Figura B.1 – Efeitos de forças transversais não paralelas a um dos eixos principais

Fenômeno análogo ocorre na seção tipo cantoneira. No entanto, como o centro de torção não coincide com centro geométrico, um carregamento transversal que passe pelo CG da cantoneira produzirá, também, esforços de torção na seção, por isso, esse perfil não é indicado quando há ocorrência de carregamentos transversais, apenas para trabalhar à tração ou à compressão.

As tensões e deslocamentos podem ser calculados utilizando-se as equações completas da Resistência dos Materiais, válidas para eixos de referências diferentes dos eixos principais de inércia, conforme mostrado nas equações B.1 a B.4.

Utilizando-se as equações completas da Resistência dos Materiais, válidas para eixos de referências diferentes dos eixos principais de inércia, as tensões normais e de cisalhamento, decorrentes do momento fletor aplicado no perfil, são obtidas por meio das equações B.1 e B.2, respectivamente.

$$\sigma = -\frac{I_x M_y - I_{xy} M_x}{I_x I_y - I_{xy}^2} x + \frac{I_y M_x - I_{xy} M_y}{I_x I_y - I_{xy}^2} y \quad (\text{eq. B.1})$$

$$\tau \cdot t = \frac{V_y I_{xy} + V_x I_x}{I_x I_y - I_{xy}^2} S_y - \frac{V_x I_{xy} + V_y I_y}{I_x I_y - I_{xy}^2} S_x \quad (\text{eq. B.2})$$

Analogamente, os deslocamentos na direção x (u) e y (v) são obtidos por meio das equações B.3 e B.4, respectivamente.

$$Eu'' = \frac{M_y I_x - M_x I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} \quad (\text{eq. B.3})$$

$$Ev'' = \frac{-M_x I_y + M_y I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} \quad (\text{eq. B.4})$$



# **Anexo C**

---

Seções Transversais dos  
Perfis Formados a Frio  
Indicados na ABNT NBR  
6355:2012

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.1 - Cantoneira de abas iguais - Aço sem revestimento: dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões				Eixo x/Eixo y				Eixos principais				torção/empenamento				
	m	A	b <sub>f</sub>	t = t <sub>n</sub>	r <sub>i</sub>	I <sub>x</sub> = I <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> = W <sub>y</sub>	r <sub>x</sub> = r <sub>y</sub>	X <sub>g</sub> = Y <sub>g</sub>	I <sub>xy</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	X <sub>0</sub>	r <sub>0</sub>
L	kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>6</sup>	cm	cm	
30 x 2,00	0,89	1,13	30	2,00	2,00	1,00	0,46	0,94	0,84	-0,62	1,62	0,37	0,57	0,02	0,00	1,05	1,69
30 x 2,25	0,99	1,27	30	2,25	2,25	1,11	0,52	0,93	0,85	-0,70	1,80	0,41	0,57	0,02	0,00	1,05	1,69
30 x 2,65	1,16	1,47	30	2,65	2,65	1,27	0,60	0,93	0,87	-0,81	2,08	0,46	0,56	0,03	0,00	1,05	1,68
30 x 3,00	1,30	1,65	30	3,00	3,00	1,41	0,67	0,92	0,89	-0,90	2,30	0,51	0,55	0,05	0,00	1,05	1,67
40 x 2,00	1,20	1,53	40	2,00	2,00	2,44	0,84	1,26	1,09	-1,51	3,95	0,93	0,78	0,02	0,00	1,40	2,27
40 x 2,25	1,35	1,72	40	2,25	2,25	2,71	0,94	1,26	1,10	-1,69	4,40	1,03	0,77	0,03	0,00	1,40	2,26
40 x 2,65	1,57	2,00	40	2,65	2,65	3,14	1,09	1,25	1,12	-1,96	5,10	1,18	0,77	0,05	0,00	1,40	2,26
40 x 3,00	1,77	2,25	40	3,00	3,00	3,50	1,22	1,25	1,14	-2,20	5,69	1,30	0,76	0,07	0,00	1,40	2,25
50 x 2,00	1,52	1,93	50	2,00	2,00	4,85	1,33	1,58	1,34	-2,98	7,84	1,87	0,98	0,03	0,00	1,76	2,85
50 x 2,25	1,70	2,17	50	2,25	2,25	5,41	1,48	1,58	1,35	-3,34	8,75	2,08	0,98	0,04	0,00	1,75	2,84
50 x 2,65	1,99	2,53	50	2,65	2,65	6,28	1,73	1,57	1,37	-3,89	10,17	2,39	0,97	0,06	0,00	1,75	2,83
50 x 3,00	2,24	2,85	50	3,00	3,00	7,02	1,94	1,57	1,39	-4,37	11,39	2,65	0,96	0,09	0,00	1,75	2,83
50 x 3,35	2,48	3,17	50	3,35	3,35	7,74	2,15	1,56	1,41	-4,84	12,58	2,90	0,96	0,12	0,00	1,75	2,82
50 x 3,75	2,76	3,52	50	3,75	3,75	8,53	2,39	1,56	1,42	-5,37	13,90	3,17	0,95	0,16	0,00	1,75	2,81
50 x 4,25	3,10	3,95	50	4,25	4,25	9,49	2,67	1,55	1,45	-6,01	15,50	3,48	0,94	0,24	0,00	1,75	2,80
50 x 4,75	3,44	4,38	50	4,75	4,75	10,40	2,95	1,54	1,47	-6,63	17,04	3,77	0,93	0,33	0,00	1,74	2,79
50 x 6,30	4,43	5,65	50	6,30	6,30	12,96	3,75	1,51	1,55	-8,45	21,41	4,50	0,89	0,75	0,00	1,74	2,76
60 x 2,00	1,83	2,33	60	2,00	2,00	8,48	1,92	1,91	1,59	-5,19	13,68	3,29	1,19	0,03	0,00	2,11	3,42
60 x 2,25	2,05	2,62	60	2,25	2,25	9,48	2,16	1,90	1,60	-5,81	15,29	3,66	1,18	0,04	0,00	2,11	3,42
60 x 2,65	2,41	3,06	60	2,65	2,65	11,03	2,52	1,90	1,62	-6,80	17,82	4,23	1,18	0,07	0,00	2,11	3,41
60 x 3,00	2,71	3,45	60	3,00	3,00	12,35	2,83	1,89	1,64	-7,64	20,00	4,71	1,17	0,10	0,00	2,10	3,40
60 x 3,35	3,01	3,84	60	3,35	3,35	13,65	3,14	1,89	1,65	-8,47	22,12	5,18	1,16	0,14	0,00	2,10	3,40
60 x 3,75	3,35	4,27	60	3,75	3,75	15,10	3,49	1,88	1,67	-9,41	24,51	5,68	1,15	0,20	0,00	2,10	3,39
60 x 4,25	3,77	4,80	60	4,25	4,25	16,85	3,91	1,87	1,70	-10,56	27,41	6,28	1,14	0,29	0,00	2,10	3,38
60 x 4,75	4,18	5,33	60	4,75	4,75	18,53	4,33	1,86	1,72	-11,69	30,22	6,85	1,13	0,40	0,00	2,10	3,37
60 x 6,30	5,42	6,91	60	6,30	6,30	23,38	5,56	1,84	1,79	-15,01	38,39	8,36	1,10	0,91	0,00	2,09	3,34
80 x 3,00	3,65	4,65	80	3,00	3,00	29,95	5,11	2,54	2,14	-18,38	48,32	11,57	1,58	0,14	0,00	2,81	4,56
80 x 3,35	4,06	5,18	80	3,35	3,35	33,18	5,68	2,53	2,15	-20,42	53,60	12,76	1,57	0,19	0,00	2,81	4,55
80 x 3,75	4,53	5,77	80	3,75	3,75	36,81	6,32	2,53	2,17	-22,72	59,54	14,09	1,56	0,27	0,00	2,81	4,54
80 x 4,25	5,10	6,50	80	4,25	4,25	41,25	7,11	2,52	2,20	-25,56	66,82	15,69	1,55	0,39	0,00	2,80	4,53
80 x 4,75	5,67	7,23	80	4,75	4,75	45,59	7,89	2,51	2,22	-28,36	73,95	17,22	1,54	0,54	0,00	2,80	4,52
80 x 6,30	7,40	9,43	80	6,30	6,30	58,32	10,22	2,49	2,29	-36,76	95,07	21,56	1,51	1,25	0,00	2,80	4,49
80 x 8,00	9,11	11,61	80	8,00	12,00	70,05	12,51	2,46	2,40	-45,88	115,93	24,17	1,44	2,47	0,00	2,83	4,48

Tabela C.1. (continuação)

Perfil	m		A	Dimensões				Eixo x/Eixo y				Eixos principais				torção/empenamento			
	kg/m	cm <sup>2</sup>		b <sub>f</sub>	t = t <sub>h</sub>	r <sub>i</sub>	I <sub>x</sub> = I <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> = W <sub>y</sub>	r <sub>x</sub> = r <sub>y</sub>	X <sub>g</sub> = Y <sub>g</sub>	I <sub>wy</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	k	I <sub>w</sub>	X <sub>0</sub> <sup>a</sup>	r <sub>0</sub>	
100 x 3,75	5,71	7,27	7,27	100	3,75	3,75	73,11	9,98	3,17	2,67	117,98	28,25	1,97	0,34	0,00	3,51	5,70		
100 x 4,25	6,44	8,20	8,20	100	4,25	4,25	82,13	11,24	3,16	2,70	132,68	31,57	1,96	0,49	0,00	3,51	5,69		
100 x 4,75	7,17	9,13	9,13	100	4,75	4,75	90,97	12,49	3,16	2,72	147,14	34,80	1,95	0,69	0,00	3,51	5,68		
100 x 6,30	9,38	11,95	11,95	100	6,30	6,30	117,30	16,27	3,13	2,79	190,46	44,15	1,92	1,58	0,00	3,50	5,65		
100 x 8,00	11,63	14,81	14,81	100	8,00	12,00	142,92	20,13	3,11	2,90	234,72	51,12	1,86	3,16	0,00	3,53	5,64		
100 x 9,50	13,60	17,32	17,32	100	9,50	14,25	164,30	23,39	3,08	2,98	271,38	57,22	1,82	5,21	0,00	3,54	5,61		
100 x 12,50	17,35	22,10	22,10	100	12,50	18,75	201,48	29,35	3,02	3,14	336,79	66,18	1,73	11,50	0,00	3,55	5,55		
125 x 4,75	9,03	11,50	11,50	125	4,75	4,75	180,72	19,74	3,96	3,34	291,65	69,78	2,46	0,86	0,00	4,39	7,12		
125 x 6,30	11,85	15,10	15,10	125	6,30	6,30	234,43	25,81	3,94	3,42	379,45	89,42	2,43	2,00	0,00	4,38	7,09		
125 x 8,00	14,77	18,81	18,81	125	8,00	12,00	288,48	32,13	3,92	3,52	471,03	105,92	2,37	4,01	0,00	4,41	7,08		
125 x 9,50	17,33	22,07	22,07	125	9,50	14,25	334,27	37,55	3,89	3,60	548,16	120,37	2,34	6,63	0,00	4,42	7,06		
125 x 12,50	22,25	28,35	28,35	125	12,50	18,75	417,54	47,74	3,84	3,75	690,99	144,08	2,25	14,75	0,00	4,42	7,00		
125 x 16,00	27,67	35,24	35,24	125	16,00	24,00	499,94	58,40	3,77	3,94	836,70	163,18	2,15	30,04	0,00	4,44	6,93		
150 x 4,75	10,90	13,88	13,88	150	4,75	4,75	315,79	28,62	4,77	3,97	508,90	123,67	2,97	1,04	0,00	5,27	8,56		
150 x 6,30	14,32	18,25	18,25	150	6,30	6,30	411,25	37,52	4,75	4,04	664,31	158,19	2,94	2,41	0,00	5,27	8,53		
150 x 8,00	17,91	22,81	22,81	150	8,00	12,00	509,13	46,90	4,72	4,14	828,24	190,02	2,89	4,86	0,00	5,29	8,52		
150 x 9,50	21,06	26,82	26,82	150	9,50	14,25	592,75	54,99	4,70	4,22	967,63	217,88	2,85	8,06	0,00	5,30	8,50		
150 x 12,50	27,16	34,60	34,60	150	12,50	18,75	748,36	70,43	4,65	4,37	1230,60	266,13	2,77	18,00	0,00	5,30	8,45		
150 x 16,00	33,95	43,24	43,24	150	16,00	24,00	909,56	87,10	4,59	4,56	1509,21	309,92	2,68	36,86	0,00	5,31	8,38		
175 x 4,75	12,76	16,25	16,25	175	4,75	4,75	505,44	39,16	5,58	4,59	813,71	197,17	3,48	1,22	0,00	6,16	10,01		
175 x 6,30	16,80	21,40	21,40	175	6,30	6,30	660,03	51,42	5,55	4,66	1064,71	255,36	3,45	2,83	0,00	6,15	9,98		
175 x 8,00	21,05	26,81	26,81	175	8,00	12,00	820,47	64,44	5,53	4,77	1331,32	309,63	3,40	5,71	0,00	6,18	9,97		
175 x 9,50	24,78	31,57	31,57	175	9,50	14,25	958,29	75,71	5,51	4,84	1559,43	357,15	3,36	9,49	0,00	6,18	9,94		
175 x 12,50	32,06	40,85	40,85	175	12,50	18,75	1218,34	97,43	5,46	5,00	1994,63	442,05	3,29	21,25	0,00	6,18	9,89		
175 x 16,00	40,23	51,24	51,24	175	16,00	24,00	1494,75	121,29	5,40	5,18	2465,50	523,99	3,20	43,68	0,00	6,19	9,83		
200 x 4,75	14,62	18,63	18,63	200	4,75	4,75	758,94	51,34	6,38	5,22	1220,92	296,96	3,99	1,40	0,00	7,04	11,45		
200 x 6,30	19,27	24,55	24,55	200	6,30	6,30	993,07	67,51	6,36	5,29	1600,31	385,84	3,96	3,24	0,00	7,03	11,42		
200 x 8,00	24,19	30,81	30,81	200	8,00	12,00	1238,11	84,76	6,34	5,39	2005,25	470,97	3,91	6,57	0,00	7,06	11,41		
200 x 9,50	28,51	36,32	36,32	200	9,50	14,25	1449,40	99,73	6,32	5,47	2353,22	545,57	3,88	10,92	0,00	7,06	11,39		
200 x 12,50	36,97	47,10	47,10	200	12,50	18,75	1851,83	128,76	6,27	5,62	3022,10	681,56	3,80	24,51	0,00	7,06	11,34		
200 x 16,00	46,51	59,24	59,24	200	16,00	24,00	2286,69	161,01	6,21	5,80	3755,52	817,87	3,72	50,50	0,00	7,07	11,28		
200 x 19,00	54,39	69,29	69,29	200	19,00	28,50	2628,81	187,15	6,16	5,95	4342,03	915,58	3,64	83,30	0,00	7,07	11,22		

<sup>a</sup> Nesse caso, X<sub>0</sub> é a distância do centro de torção em relação ao centroide, na direção do eixo principal de maior inércia (eixo 1).

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.2 - Perfil U simples - Aço sem revestimento - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões							Eixo x					Eixo y			torção/empenamento		
	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	t = t <sub>f</sub>	r <sub>i</sub>	I <sub>x</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	X <sub>g</sub>	X <sub>0</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>	
U	kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>6</sup>	cm	
50 x 25 x 1,20	0,90	1,15	50	25	1,20	1,2	4,54	1,82	1,99	0,68	1,54	0,72	0,39	0,79	0,006	3,03	2,63	
50 x 25 x 1,50	1,12	1,43	50	25	1,50	1,5	5,54	2,21	1,97	0,69	1,53	0,88	0,49	0,78	0,011	3,67	2,61	
50 x 25 x 2,00	1,47	1,87	50	25	2,00	2	7,07	2,83	1,95	0,72	1,52	1,13	0,63	0,78	0,025	4,64	2,59	
50 x 25 x 2,25	1,64	2,08	50	25	2,25	2,25	7,79	3,12	1,93	0,73	1,51	1,25	0,70	0,77	0,035	5,09	2,57	
50 x 25 x 2,65	1,90	2,42	50	25	2,65	2,65	8,85	3,54	1,91	0,75	1,50	1,42	0,81	0,77	0,057	5,75	2,55	
50 x 25 x 3,00	2,12	2,70	50	25	3,00	3	9,71	3,89	1,90	0,77	1,50	1,57	0,91	0,76	0,081	6,27	2,53	
75 x 40 x 1,20	1,42	1,81	75	40	1,20	1,2	16,67	4,44	3,03	1,09	2,53	2,97	1,02	1,28	0,009	28,54	4,15	
75 x 40 x 1,50	1,77	2,25	75	40	1,50	1,5	20,50	5,47	3,02	1,10	2,52	3,67	1,27	1,28	0,017	34,98	4,14	
75 x 40 x 2,00	2,33	2,97	75	40	2,00	2	26,60	7,09	2,99	1,13	2,51	4,78	1,66	1,27	0,040	45,13	4,11	
75 x 40 x 2,25	2,61	3,32	75	40	2,25	2,25	29,52	7,87	2,98	1,14	2,51	5,32	1,86	1,27	0,056	49,94	4,10	
75 x 40 x 2,65	3,04	3,88	75	40	2,65	2,65	34,01	9,07	2,96	1,16	2,50	6,15	2,16	1,26	0,091	57,28	4,07	
75 x 40 x 3,00	3,42	4,35	75	40	3,00	3	37,76	10,07	2,94	1,17	2,49	6,85	2,42	1,25	0,130	63,34	4,06	
75 x 40 x 3,35	3,79	4,82	75	40	3,35	3,35	41,34	11,02	2,93	1,19	2,48	7,52	2,68	1,25	0,180	69,09	4,04	
75 x 40 x 3,75	4,20	5,35	75	40	3,75	3,75	45,23	12,06	2,91	1,21	2,48	8,26	2,96	1,24	0,251	75,27	4,02	
75 x 40 x 4,25	4,71	5,99	75	40	4,25	4,25	49,81	13,28	2,88	1,23	2,47	9,14	3,30	1,23	0,361	82,46	3,99	
75 x 40 x 4,75	5,20	6,62	75	40	4,75	4,75	54,07	14,42	2,86	1,26	2,46	9,97	3,64	1,23	0,497	89,06	3,96	
100 x 40 x 1,20	1,66	2,11	100	40	1,20	1,2	32,33	6,47	3,91	0,94	2,27	3,25	1,06	1,24	0,010	56,25	4,69	
100 x 40 x 1,50	2,06	2,63	100	40	1,50	1,5	39,88	7,98	3,90	0,96	2,26	4,01	1,32	1,24	0,020	69,11	4,67	
100 x 40 x 2,00	2,72	3,47	100	40	2,00	2	51,99	10,40	3,87	0,98	2,25	5,23	1,73	1,23	0,046	89,52	4,64	
100 x 40 x 2,25	3,05	3,88	100	40	2,25	2,25	57,82	11,56	3,86	0,99	2,25	5,82	1,93	1,22	0,065	99,25	4,63	
100 x 40 x 2,65	3,56	4,54	100	40	2,65	2,65	66,87	13,37	3,84	1,01	2,24	6,74	2,25	1,22	0,106	114,20	4,61	
100 x 40 x 3,00	4,01	5,10	100	40	3,00	3	74,48	14,90	3,82	1,02	2,23	7,52	2,53	1,21	0,153	126,66	4,59	
100 x 40 x 3,35	4,44	5,66	100	40	3,35	3,35	81,83	16,37	3,80	1,04	2,22	8,27	2,79	1,21	0,212	138,56	4,57	
100 x 40 x 3,75	4,94	6,29	100	40	3,75	3,75	89,89	17,98	3,78	1,06	2,21	9,09	3,09	1,20	0,294	151,48	4,54	
100 x 40 x 4,25	5,54	7,06	100	40	4,25	4,25	99,49	19,90	3,75	1,08	2,20	10,08	3,45	1,20	0,424	166,66	4,51	
100 x 40 x 4,75	6,13	7,81	100	40	4,75	4,75	108,55	21,71	3,73	1,10	2,19	11,02	3,80	1,19	0,587	180,78	4,48	
100 x 40 x 6,30	7,88	10,04	100	40	6,30	6,3	133,35	26,67	3,65	1,18	2,15	13,60	4,82	1,16	1,326	218,30	4,39	
100 x 50 x 1,20	1,85	2,35	100	50	1,20	1,2	38,19	7,64	4,03	1,30	3,10	5,99	1,62	1,60	0,011	102,97	5,33	
100 x 50 x 1,50	2,30	2,93	100	50	1,50	1,5	47,15	9,43	4,01	1,32	3,09	7,41	2,01	1,59	0,022	126,77	5,31	
100 x 50 x 2,00	3,04	3,87	100	50	2,00	2	61,59	12,32	3,99	1,34	3,08	9,71	2,65	1,58	0,052	164,78	5,28	
100 x 50 x 2,25	3,40	4,33	100	50	2,25	2,25	68,57	13,71	3,98	1,35	3,07	10,82	2,97	1,58	0,073	183,02	5,27	
100 x 50 x 2,65	3,98	5,07	100	50	2,65	2,65	79,42	15,88	3,96	1,37	3,07	12,57	3,46	1,57	0,119	211,18	5,25	

Tabela C.2 (continuação)

Perfil	A		Dimensões				Eixo x						Eixo y			torção/empenamento		
	m kg/m	cm <sup>2</sup>	b <sub>w</sub> mm	b <sub>f</sub> mm	t = t <sub>n</sub> mm	r <sub>i</sub> mm	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	X <sub>g</sub> cm	x <sub>0</sub> cm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>w</sub> cm <sup>6</sup>	f <sub>0</sub> cm	
100 x 50 x 3,00	4,48	5,70	100	50	3,00	3	88,60	17,72	3,94	1,39	3,06	14,05	3,89	1,57	0,171	234,81	5,23	
100 x 50 x 3,35	4,97	6,33	100	50	3,35	3,35	97,48	19,50	3,92	1,41	3,05	15,49	4,31	1,56	0,237	257,51	5,21	
100 x 50 x 3,75	5,52	7,04	100	50	3,75	3,75	107,26	21,45	3,90	1,42	3,04	17,09	4,78	1,56	0,330	282,34	5,19	
100 x 50 x 4,25	6,21	7,91	100	50	4,25	4,25	118,97	23,79	3,88	1,45	3,03	19,01	5,35	1,55	0,476	311,76	5,16	
100 x 50 x 4,75	6,88	8,76	100	50	4,75	4,75	130,09	26,02	3,85	1,47	3,02	20,86	5,91	1,54	0,658	339,43	5,13	
100 x 50 x 6,30	8,87	11,30	100	50	6,30	6,3	161,01	32,20	3,78	1,55	2,99	26,07	7,55	1,52	1,493	414,74	5,05	
100 x 75 x 2,65	5,02	6,39	100	75	2,65	2,65	110,82	22,16	4,16	2,38	5,27	38,21	7,47	2,44	0,150	645,05	7,15	
100 x 75 x 3,00	5,66	7,20	100	75	3,00	3	123,88	24,78	4,15	2,40	5,26	42,85	8,40	2,44	0,216	719,59	7,13	
100 x 75 x 3,35	6,28	8,01	100	75	3,35	3,35	136,59	27,32	4,13	2,42	5,26	47,40	9,33	2,43	0,299	791,79	7,11	
100 x 75 x 3,75	7,00	8,91	100	75	3,75	3,75	150,69	30,14	4,11	2,44	5,25	52,49	10,37	2,43	0,417	871,49	7,10	
100 x 75 x 4,25	7,87	10,03	100	75	4,25	4,25	167,67	33,53	4,09	2,46	5,24	58,68	11,66	2,42	0,603	966,96	7,07	
100 x 75 x 4,75	8,74	11,13	100	75	4,75	4,75	183,96	36,79	4,06	2,49	5,23	64,69	12,91	2,41	0,836	1057,95	7,05	
100 x 75 x 6,30	11,34	14,45	100	75	6,30	6,3	230,15	46,03	3,99	2,57	5,21	82,13	16,67	2,38	1,909	1312,73	6,98	
100 x 75 x 8,00	13,83	17,62	100	75	8,00	12	266,67	53,33	3,89	2,70	5,22	97,33	20,30	2,35	3,756	1547,82	6,92	
125 x 50 x 1,20	2,08	2,65	125	50	1,20	1,2	63,82	10,21	4,91	1,16	2,85	6,40	1,67	1,55	0,013	174,04	5,88	
125 x 50 x 1,50	2,59	3,30	125	50	1,50	1,5	78,93	12,63	4,89	1,18	2,84	7,92	2,07	1,55	0,025	214,57	5,86	
125 x 50 x 2,00	3,43	4,37	125	50	2,00	2	103,38	16,54	4,86	1,20	2,83	10,39	2,73	1,54	0,058	279,58	5,83	
125 x 50 x 2,25	3,84	4,90	125	50	2,25	2,25	115,26	18,44	4,85	1,21	2,82	11,59	3,06	1,54	0,083	310,91	5,82	
125 x 50 x 2,65	4,50	5,73	125	50	2,65	2,65	133,80	21,41	4,83	1,23	2,81	13,47	3,57	1,53	0,134	359,45	5,80	
125 x 50 x 3,00	5,07	6,45	125	50	3,00	3	149,55	23,93	4,81	1,24	2,80	15,07	4,01	1,53	0,193	400,35	5,78	
125 x 50 x 3,35	5,63	7,17	125	50	3,35	3,35	164,87	26,38	4,80	1,26	2,80	16,62	4,45	1,52	0,268	439,81	5,76	
125 x 50 x 3,75	6,26	7,98	125	50	3,75	3,75	181,85	29,10	4,78	1,28	2,79	18,35	4,93	1,52	0,373	483,18	5,73	
125 x 50 x 4,25	7,04	8,97	125	50	4,25	4,25	202,28	32,37	4,75	1,30	2,77	20,44	5,53	1,51	0,539	534,87	5,70	
125 x 50 x 4,75	7,81	9,95	125	50	4,75	4,75	221,87	35,50	4,72	1,32	2,76	22,45	6,11	1,50	0,747	583,83	5,67	
125 x 50 x 6,30	10,10	12,87	125	50	6,30	6,3	277,25	44,36	4,64	1,40	2,73	28,16	7,81	1,48	1,701	719,09	5,58	
125 x 75 x 2,65	5,54	7,06	125	75	2,65	2,65	183,39	29,34	5,10	2,17	4,92	41,25	7,74	2,42	0,165	1090,88	7,49	
125 x 75 x 3,00	6,24	7,95	125	75	3,00	3	205,37	32,86	5,08	2,19	4,92	46,29	8,72	2,41	0,238	1218,99	7,47	
125 x 75 x 3,35	6,94	8,84	125	75	3,35	3,35	226,84	36,29	5,06	2,21	4,91	51,25	9,68	2,41	0,330	1343,56	7,45	
125 x 75 x 3,75	7,73	9,85	125	75	3,75	3,75	250,76	40,12	5,05	2,22	4,90	56,79	10,77	2,40	0,461	1481,66	7,43	
125 x 75 x 4,25	8,71	11,09	125	75	4,25	4,25	279,74	44,76	5,02	2,25	4,89	63,56	12,10	2,39	0,667	1648,01	7,41	
125 x 75 x 4,75	9,67	12,32	125	75	4,75	4,75	307,72	49,24	5,00	2,27	4,88	70,14	13,42	2,39	0,926	1807,54	7,38	

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.2 (continuação)

Perfil	Dimensões					Eixo x					Eixo y					torção/empenamento			
	m kg/m	A cm <sup>2</sup>	b <sub>w</sub> mm	b <sub>f</sub> mm	t = t <sub>0</sub> mm	r <sub>i</sub> mm	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	X <sub>g</sub> cm	x <sub>0</sub> cm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>w</sub> cm <sup>6</sup>	t <sub>0</sub> cm		
U																			
125 x 75 x 6,30	12,58	16,02	125	75	6,30	6,3	388,20	62,11	4,92	4,85	89,36	17,35	2,36	2,117	2260,41	7,30			
125 x 75 x 8,00	15,40	19,62	125	75	8,00	12	453,07	72,81	4,82	4,86	106,87	21,25	2,33	4,182	2688,83	7,23			
150 x 50 x 2,00	3,82	4,87	150	50	2,00	2	158,88	21,18	5,71	1,09	10,93	2,79	1,50	0,065	430,47	6,46			
150 x 50 x 2,25	4,28	5,46	150	50	2,25	2,25	177,32	23,64	5,70	1,10	12,20	3,13	1,49	0,092	479,10	6,44			
150 x 50 x 2,65	5,02	6,39	150	50	2,65	2,65	206,17	27,49	5,68	1,12	14,18	3,65	1,49	0,150	554,61	6,42			
150 x 50 x 3,00	5,66	7,20	150	50	3,00	3	230,76	30,77	5,66	1,13	15,87	4,10	1,48	0,216	618,42	6,40			
150 x 50 x 3,35	6,28	8,01	150	50	3,35	3,35	254,76	33,97	5,64	1,15	17,52	4,55	1,48	0,299	680,15	6,38			
150 x 50 x 3,75	7,00	8,91	150	50	3,75	3,75	281,45	37,53	5,62	1,16	19,35	5,04	1,47	0,417	748,21	6,35			
150 x 50 x 4,25	7,87	10,03	150	50	4,25	4,25	313,74	41,83	5,59	1,19	21,57	5,66	1,47	0,603	829,62	6,32			
150 x 50 x 4,75	8,74	11,13	150	50	4,75	4,75	344,84	45,98	5,57	1,21	23,70	6,25	1,46	0,836	907,06	6,29			
150 x 50 x 6,30	11,34	14,45	150	50	6,30	6,3	433,86	57,85	5,48	1,28	29,80	8,01	1,44	1,909	1123,08	6,20			
150 x 50 x 8,00	13,83	17,62	150	50	8,00	12	503,31	67,11	5,34	1,38	35,23	9,72	1,41	3,756	1320,98	6,07			
150 x 75 x 2,65	6,06	7,72	150	75	2,65	2,65	278,09	37,08	6,00	2,00	43,77	7,95	2,38	0,181	1677,77	7,94			
150 x 75 x 3,00	6,83	8,70	150	75	3,00	3	311,80	41,57	5,99	2,01	49,14	8,96	2,38	0,261	1876,92	7,92			
150 x 75 x 3,35	7,60	9,68	150	75	3,35	3,35	344,82	45,98	5,97	2,03	54,42	9,95	2,37	0,362	2071,06	7,91			
150 x 75 x 3,75	8,47	10,79	150	75	3,75	3,75	381,72	50,90	5,95	2,05	60,35	11,07	2,37	0,505	2286,90	7,88			
150 x 75 x 4,25	9,54	12,16	150	75	4,25	4,25	426,60	56,88	5,92	2,07	67,58	12,45	2,36	0,731	2547,82	7,86			
150 x 75 x 4,75	10,60	13,51	150	75	4,75	4,75	470,11	62,68	5,90	2,09	74,63	13,81	2,35	1,015	2799,05	7,83			
150 x 75 x 6,30	13,81	17,60	150	75	6,30	6,3	596,48	79,53	5,82	2,17	95,30	17,87	2,33	2,326	3518,53	7,75			
150 x 75 x 8,00	16,97	21,62	150	75	8,00	12	704,95	93,99	5,71	2,28	114,65	21,96	2,30	4,608	4209,87	7,65			
200 x 50 x 2,00	4,61	5,87	200	50	2,00	2	317,32	31,73	7,35	0,92	11,74	2,88	1,41	0,078	848,40	7,83			
200 x 50 x 2,25	5,17	6,58	200	50	2,25	2,25	354,62	35,46	7,34	0,93	13,11	3,22	1,41	0,111	945,18	7,81			
200 x 50 x 2,65	6,06	7,72	200	50	2,65	2,65	413,21	41,32	7,32	0,95	15,24	3,76	1,41	0,181	1095,90	7,79			
200 x 50 x 3,00	6,83	8,70	200	50	3,00	3	463,39	46,34	7,30	0,96	17,07	4,23	1,40	0,261	1223,68	7,77			
200 x 50 x 3,35	7,60	9,68	200	50	3,35	3,35	512,58	51,26	7,28	0,98	18,85	4,68	1,40	0,362	1347,72	7,74			
200 x 50 x 3,75	8,47	10,79	200	50	3,75	3,75	567,56	56,76	7,25	0,99	20,83	5,20	1,39	0,505	1484,95	7,72			
200 x 50 x 4,25	9,54	12,16	200	50	4,25	4,25	634,48	63,45	7,22	1,02	23,23	5,83	1,38	0,731	1649,85	7,69			
200 x 50 x 4,75	10,60	13,51	200	50	4,75	4,75	699,39	69,94	7,20	1,04	25,55	6,45	1,38	1,015	1807,54	7,65			
200 x 50 x 6,30	13,81	17,60	200	50	6,30	6,3	888,08	88,81	7,10	1,11	32,20	8,27	1,35	2,326	2252,32	7,55			
200 x 50 x 8,00	16,97	21,62	200	50	8,00	12	1045,75	104,57	6,95	1,20	38,34	10,08	1,33	4,608	2668,14	7,40			

Tabela C.2 (continuação)

Perfil	Dimensões				Eixo x						Eixo y				torção/empenamento			
	m kg/m	A cm <sup>2</sup>	b <sub>w</sub> mm	b <sub>t</sub> mm	t = t <sub>h</sub> mm	r <sub>i</sub> mm	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	X <sub>g</sub> cm	x <sub>0</sub> cm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>w</sub> cm <sup>6</sup>	r <sub>0</sub> cm	
200 x 75 x 2,65	7,10	9,04	200	75	2,65	2,65	542,22	54,22	7,74	1,72	4,14	47,70	8,26	2,30	0,211	3312,18	9,07	
200 x 75 x 3,00	8,01	10,20	200	75	3,00	3	608,93	60,89	7,72	1,74	4,13	53,58	9,30	2,29	0,306	3710,53	9,05	
200 x 75 x 3,35	8,91	11,36	200	75	3,35	3,35	674,51	67,45	7,71	1,75	4,12	59,37	10,33	2,29	0,424	4100,12	9,03	
200 x 75 x 3,75	9,94	12,66	200	75	3,75	3,75	748,10	74,81	7,69	1,77	4,11	65,87	11,50	2,28	0,593	4534,78	9,01	
200 x 75 x 4,25	11,21	14,28	200	75	4,25	4,25	838,04	83,80	7,66	1,79	4,10	73,83	12,94	2,27	0,859	5062,47	8,98	
200 x 75 x 4,75	12,47	15,88	200	75	4,75	4,75	925,74	92,57	7,63	1,82	4,09	81,59	14,36	2,27	1,193	5573,07	8,95	
200 x 75 x 6,30	16,29	20,75	200	75	6,30	6,3	1183,54	118,35	7,55	1,89	4,05	104,47	18,61	2,24	2,742	7050,81	8,86	
200 x 75 x 8,00	20,11	25,62	200	75	8,00	12	1414,39	141,44	7,43	1,99	4,03	126,56	22,95	2,22	5,461	8497,13	8,74	
200 x 100 x 2,65	8,14	10,37	200	100	2,65	2,65	671,23	67,12	8,05	2,62	6,19	105,35	14,28	3,19	0,242	7230,50	10,64	
200 x 100 x 3,00	9,19	11,70	200	100	3,00	3	754,46	75,45	8,03	2,64	6,18	118,54	16,10	3,18	0,351	8113,14	10,62	
200 x 100 x 3,35	10,23	13,03	200	100	3,35	3,35	836,45	83,64	8,01	2,65	6,17	131,57	17,91	3,18	0,487	8979,48	10,60	
200 x 100 x 3,75	11,41	14,54	200	100	3,75	3,75	928,63	92,86	7,99	2,67	6,16	146,24	19,96	3,17	0,681	9949,85	10,58	
200 x 100 x 4,25	12,88	16,41	200	100	4,25	4,25	1041,61	104,16	7,97	2,70	6,15	164,29	22,49	3,16	0,987	11133,57	10,55	
200 x 100 x 4,75	14,33	18,26	200	100	4,75	4,75	1152,09	115,21	7,94	2,72	6,14	182,00	25,00	3,16	1,372	12285,30	10,53	
200 x 100 x 6,30	18,76	23,90	200	100	6,30	6,3	1479,01	147,90	7,87	2,79	6,11	234,76	32,57	3,13	3,158	15657,61	10,44	
200 x 100 x 8,00	23,25	29,62	200	100	8,00	12	1783,03	178,30	7,76	2,90	6,10	286,79	40,39	3,11	6,313	19025,36	10,35	
250 x 100 x 2,65	9,18	11,69	250	100	2,65	2,65	1122,57	89,81	9,80	2,34	5,69	112,63	14,70	3,10	0,273	12228,31	11,75	
250 x 100 x 3,00	10,37	13,20	250	100	3,00	3	1262,96	101,04	9,78	2,36	5,68	126,77	16,58	3,10	0,396	13732,54	11,73	
250 x 100 x 3,35	11,54	14,71	250	100	3,35	3,35	1401,53	112,12	9,76	2,37	5,67	140,74	18,45	3,09	0,550	15211,69	11,71	
250 x 100 x 3,75	12,88	16,41	250	100	3,75	3,75	1557,70	124,62	9,74	2,39	5,66	156,50	20,56	3,09	0,769	16871,78	11,68	
250 x 100 x 4,25	14,55	18,53	250	100	4,25	4,25	1749,62	139,97	9,72	2,41	5,65	175,89	23,18	3,08	1,115	18901,83	11,65	
250 x 100 x 4,75	16,20	20,63	250	100	4,75	4,75	1937,89	155,03	9,69	2,43	5,64	194,93	25,76	3,07	1,550	20882,49	11,62	
250 x 100 x 6,30	21,23	27,05	250	100	6,30	6,3	2498,72	199,90	9,61	2,50	5,60	251,83	33,59	3,05	3,575	26716,05	11,54	
250 x 100 x 8,00	26,39	33,62	250	100	8,00	12	3031,02	242,48	9,49	2,60	5,58	308,79	41,74	3,03	7,165	32599,97	11,42	
300 x 100 x 2,65	13,02	14,70	300	100	2,65	2,65	1720,72	114,71	11,50	2,11	5,27	118,43	15,02	3,02	0,304	18787,48	13,00	
300 x 100 x 3,00	11,54	14,70	300	100	3,00	3	1937,22	129,15	11,48	2,13	5,26	133,32	16,94	3,01	0,441	21110,31	12,98	
300 x 100 x 3,35	12,86	16,38	300	100	3,35	3,35	2151,24	143,42	11,46	2,15	5,25	148,04	18,85	3,01	0,612	23397,20	12,96	
300 x 100 x 3,75	14,36	18,29	300	100	3,75	3,75	2392,81	159,52	11,44	2,16	5,24	164,65	21,01	3,00	0,856	25967,19	12,93	
300 x 100 x 4,25	16,22	20,66	300	100	4,25	4,25	2690,26	179,35	11,41	2,18	5,23	185,10	23,68	2,99	1,242	29114,97	12,90	
300 x 100 x 4,75	18,06	23,01	300	100	4,75	4,75	2982,71	198,85	11,39	2,21	5,21	205,20	26,33	2,99	1,729	32191,74	12,87	
300 x 100 x 6,30	23,70	30,20	300	100	6,30	6,3	3857,91	257,19	11,30	2,27	5,18	265,33	34,35	2,96	3,991	41288,31	12,78	
300 x 100 x 8,00	29,53	37,62	300	100	8,00	12	4700,96	313,40	11,18	2,37	5,15	326,12	42,73	2,94	8,018	50522,51	12,66	

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.3 - Perfil U enrijecido - Aço sem revestimento - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões										Eixo x					Eixo y					torção/empenamento	
	Ue	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>n</sub>	r <sub>1</sub>	l <sub>x</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	X <sub>g</sub>	X <sub>0</sub>	l <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>			
50 x 25 x 10 x 1,20	1,06	1,35	50	25	10,00	1,20	1,50	2,00	5,24	2,09	1,97	0,93	2,17	1,23	0,78	0,95	0,01	8,13	3,08			
50 x 25 x 10 x 1,50	1,30	1,65	50	25	10,00	1,50	1,50	6,32	2,53	1,96	0,93	2,13	1,46	0,93	0,94	0,01	9,62	3,04				
50 x 25 x 10 x 2,00	1,68	2,14	50	25	10,00	2,00	2,00	7,93	3,17	1,93	0,93	2,07	1,78	1,13	0,91	0,03	11,68	2,97				
50 x 25 x 10 x 2,25	1,86	2,37	50	25	10,00	2,25	2,25	8,65	3,46	1,91	0,93	2,04	1,91	1,22	0,90	0,04	12,53	2,94				
50 x 25 x 10 x 2,65	2,13	2,72	50	25	10,00	2,65	2,65	9,68	3,87	1,89	0,92	1,99	2,09	1,33	0,88	0,06	13,66	2,88				
50 x 25 x 10 x 3,00	2,36	3,01	50	25	10,00	3,00	3,00	10,46	4,18	1,86	0,92	1,95	2,21	1,40	0,86	0,09	14,45	2,83				
75 x 40 x 15 x 1,20	1,67	2,13	75	40	15,00	1,20	1,20	19,32	5,15	3,02	1,51	3,56	5,14	2,06	1,55	0,01	76,95	4,92				
75 x 40 x 15 x 1,50	2,06	2,63	75	40	15,00	1,50	1,50	23,62	6,30	3,00	1,51	3,53	6,23	2,50	1,54	0,02	92,87	4,88				
75 x 40 x 15 x 2,00	2,70	3,44	75	40	15,00	2,00	2,00	30,33	8,09	2,97	1,50	3,47	7,88	3,15	1,51	0,05	116,73	4,81				
75 x 40 x 15 x 2,25	3,01	3,83	75	40	15,00	2,25	2,25	33,47	8,93	2,96	1,50	3,44	8,62	3,45	1,50	0,06	127,47	4,78				
75 x 40 x 15 x 2,65	3,49	4,44	75	40	15,00	2,65	2,65	38,22	10,19	2,93	1,50	3,39	9,72	3,89	1,48	0,10	143,09	4,72				
75 x 40 x 15 x 3,00	3,89	4,96	75	40	15,00	3,00	3,00	42,08	11,22	2,91	1,50	3,34	10,58	4,23	1,46	0,15	155,27	4,67				
100 x 40 x 17 x 1,20	1,94	2,47	100	40	17,00	1,20	1,20	38,29	7,66	3,93	1,38	3,36	6,01	2,29	1,56	0,01	148,49	5,41				
100 x 40 x 17 x 1,50	2,40	3,06	100	40	17,00	1,50	1,50	46,97	9,39	3,92	1,38	3,33	7,30	2,78	1,54	0,02	179,90	5,37				
100 x 40 x 17 x 2,00	3,15	4,02	100	40	17,00	2,00	2,00	60,66	12,13	3,89	1,38	3,27	9,25	3,53	1,52	0,05	227,57	5,30				
100 x 40 x 17 x 2,25	3,52	4,48	100	40	17,00	2,25	2,25	67,14	13,43	3,87	1,37	3,24	10,15	3,87	1,50	0,08	249,31	5,27				
100 x 40 x 17 x 2,65	4,09	5,21	100	40	17,00	2,65	2,65	77,03	15,41	3,85	1,37	3,19	11,47	4,37	1,48	0,12	281,34	5,21				
100 x 40 x 17 x 3,00	4,58	5,83	100	40	17,00	3,00	3,00	85,19	17,04	3,82	1,37	3,15	12,51	4,76	1,47	0,17	306,71	5,17				
100 x 40 x 17 x 3,35	5,05	6,43	100	40	17,00	3,35	3,35	92,90	18,58	3,80	1,37	3,11	13,46	5,12	1,45	0,24	329,71	5,12				
100 x 50 x 17 x 1,20	2,13	2,71	100	50	17,00	1,20	1,20	44,15	8,83	4,03	1,79	4,28	10,12	3,15	1,93	0,01	246,61	6,19				
100 x 50 x 17 x 1,50	2,64	3,36	100	50	17,00	1,50	1,50	54,25	10,85	4,02	1,79	4,24	12,33	3,84	1,92	0,03	299,85	6,15				
100 x 50 x 17 x 2,00	3,47	4,42	100	50	17,00	2,00	2,00	70,26	14,05	3,99	1,78	4,18	15,76	4,90	1,89	0,06	381,65	6,08				
100 x 50 x 17 x 2,25	3,87	4,93	100	50	17,00	2,25	2,25	77,89	15,58	3,97	1,78	4,15	17,36	5,39	1,88	0,08	419,43	6,05				
100 x 50 x 17 x 2,65	4,51	5,74	100	50	17,00	2,65	2,65	89,59	17,92	3,95	1,78	4,10	19,74	6,13	1,85	0,13	475,74	5,99				
100 x 50 x 17 x 3,00	5,05	6,43	100	50	17,00	3,00	3,00	99,30	19,86	3,93	1,78	4,06	21,66	6,72	1,84	0,19	521,00	5,94				
100 x 50 x 17 x 3,35	5,57	7,10	100	50	17,00	3,35	3,35	108,55	21,71	3,91	1,77	4,02	23,43	7,26	1,82	0,27	562,68	5,89				
125 x 50 x 17 x 2,00	3,86	4,92	125	50	17,00	2,00	2,00	118,35	18,94	4,91	1,61	3,87	17,04	5,03	1,86	0,07	594,42	6,52				
125 x 50 x 17 x 2,25	4,31	5,49	125	50	17,00	2,25	2,25	131,41	21,03	4,89	1,61	3,84	18,76	5,54	1,85	0,09	654,38	6,49				
125 x 50 x 17 x 2,65	5,03	6,40	125	50	17,00	2,65	2,65	151,52	24,24	4,87	1,61	3,79	21,35	6,29	1,83	0,15	744,30	6,43				
125 x 50 x 17 x 3,00	5,63	7,18	125	50	17,00	3,00	3,00	168,35	26,94	4,84	1,61	3,75	23,44	6,91	1,81	0,22	817,11	6,39				
125 x 50 x 17 x 3,35	6,23	7,94	125	50	17,00	3,35	3,35	184,45	29,51	4,82	1,60	3,71	25,37	7,47	1,79	0,30	884,65	6,34				
125 x 50 x 17 x 3,75	6,90	8,79	125	50	17,00	3,75	3,75	201,98	32,32	4,79	1,60	3,66	27,38	8,06	1,77	0,41	955,66	6,28				
150 x 60 x 20 x 2,00	4,66	5,94	150	60	20,00	2,00	2,00	207,59	27,68	5,91	1,93	4,66	30,02	7,37	2,25	0,08	1498,57	7,86				
150 x 60 x 20 x 2,25	5,21	6,64	150	60	20,00	2,25	2,25	231,03	30,80	5,90	1,92	4,63	33,19	8,14	2,24	0,11	1655,84	7,83				
150 x 60 x 20 x 2,65	6,09	7,75	150	60	20,00	2,65	2,65	267,39	35,65	5,87	1,92	4,59	37,99	9,32	2,21	0,18	1894,61	7,77				
150 x 60 x 20 x 3,00	6,84	8,71	150	60	20,00	3,00	3,00	298,07	39,74	5,85	1,92	4,55	41,94	10,28	2,19	0,26	2090,94	7,73				
150 x 60 x 20 x 3,35	7,57	9,65	150	60	20,00	3,35	3,35	327,70	43,69	5,83	1,92	4,50	45,65	11,18	2,18	0,36	2275,90	7,68				
150 x 60 x 20 x 3,75	8,40	10,70	150	60	20,00	3,75	3,75	360,28	48,04	5,80	1,92	4,46	49,61	12,15	2,15	0,50	2473,81	7,63				
150 x 60 x 20 x 4,25	9,41	11,99	150	60	20,00	4,25	4,25	399,11	53,22	5,77	1,91	4,40	54,15	13,25	2,13	0,72	2701,76	7,56				
150 x 60 x 20 x 4,75	10,39	13,24	150	60	20,00	4,75	4,75	435,87	58,12	5,74	1,91	4,34	58,24	14,24	2,10	0,99	2909,03	7,49				

Tabela C.3 (continuação)

Perfil	Dimensões										Eixo x					Eixo y					torção/empenamento		
	Ue	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>n</sub>	r <sub>1</sub>	k	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	X <sub>g</sub>	x <sub>0</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>				
200 x 75 x 20 x 2,00	5,92	7,54	200	75	20,00	2,00	2,00	467,42	46,74	7,88	2,20	5,42	56,30	10,62	2,73	0,10	4615,39	9,94					
200 x 75 x 20 x 2,25	6,63	8,44	200	75	20,00	2,25	2,25	521,40	52,14	7,86	2,20	5,39	62,42	11,77	2,72	0,14	5118,18	9,91					
200 x 75 x 25 x 2,65	7,96	10,14	200	75	25,00	2,65	2,65	621,67	62,17	7,83	2,33	5,67	78,69	15,23	2,79	0,24	6862,49	10,06					
200 x 75 x 25 x 3,00	8,96	11,41	200	75	25,00	3,00	3,00	695,55	69,55	7,81	2,33	5,63	87,35	16,90	2,77	0,34	7616,73	10,02					
200 x 75 x 25 x 3,35	9,94	12,66	200	75	25,00	3,35	3,35	767,54	76,75	7,79	2,33	5,59	95,62	18,49	2,75	0,47	8338,10	9,97					
200 x 75 x 25 x 3,75	11,05	14,08	200	75	25,00	3,75	3,75	847,53	84,75	7,76	2,33	5,54	104,61	20,22	2,73	0,66	9123,30	9,92					
200 x 75 x 25 x 4,25	12,41	15,81	200	75	25,00	4,25	4,25	944,12	94,41	7,73	2,32	5,48	115,16	22,25	2,70	0,95	10047,64	9,85					
200 x 75 x 25 x 4,75	13,75	17,52	200	75	25,00	4,75	4,75	1036,95	103,69	7,69	2,32	5,42	124,95	24,13	2,67	1,32	10910,56	9,79					
200 x 75 x 30 x 6,30	18,23	23,22	200	75	30,00	6,30	6,30	1334,38	133,44	7,58	2,45	5,56	165,28	32,70	2,67	3,07	15417,11	9,77					
200 x 100 x 25 x 2,65	9,00	11,46	200	100	25,00	2,65	2,65	750,68	75,07	8,09	3,31	7,89	157,20	23,51	3,70	0,27	13447,29	11,89					
200 x 100 x 25 x 3,00	10,13	12,91	200	100	25,00	3,00	3,00	841,08	84,11	8,07	3,31	7,84	175,17	26,18	3,68	0,39	14970,33	11,84					
200 x 100 x 25 x 3,35	11,25	14,34	200	100	25,00	3,35	3,35	929,48	92,95	8,05	3,31	7,80	192,50	28,76	3,66	0,54	16438,12	11,79					
200 x 100 x 25 x 3,75	12,52	15,95	200	100	25,00	3,75	3,75	1028,07	102,81	8,03	3,30	7,75	211,55	31,59	3,64	0,75	18049,40	11,74					
200 x 100 x 25 x 4,25	14,08	17,94	200	100	25,00	4,25	4,25	1147,68	114,77	8,00	3,30	7,69	234,22	34,95	3,61	1,08	19966,65	11,67					
200 x 100 x 25 x 4,75	15,62	19,89	200	100	25,00	4,75	4,75	1263,30	126,33	7,97	3,29	7,63	255,66	38,13	3,59	1,49	21779,32	11,60					
250 x 85 x 25 x 2,00	7,17	9,14	250	85	25,00	2,00	2,00	871,52	87,12	9,77	2,43	6,09	88,98	14,67	3,12	0,12	11477,06	11,93					
250 x 85 x 25 x 2,25	8,04	10,24	250	85	25,00	2,25	2,25	973,59	97,39	9,75	2,43	6,06	98,87	16,29	3,11	0,17	12755,84	11,89					
250 x 85 x 25 x 2,65	9,41	11,99	250	85	25,00	2,65	2,65	1133,79	113,37	9,72	2,43	6,02	114,13	18,80	3,08	0,28	14733,46	11,84					
250 x 85 x 25 x 3,00	10,60	13,51	250	85	25,00	3,00	3,00	1270,81	127,08	9,70	2,43	5,97	126,92	20,91	3,07	0,40	16396,10	11,80					
250 x 85 x 25 x 3,35	11,78	15,01	250	85	25,00	3,35	3,35	1404,92	140,49	9,68	2,43	5,93	139,21	22,92	3,05	0,56	17996,84	11,75					
250 x 85 x 25 x 3,75	13,11	16,70	250	85	25,00	3,75	3,75	1554,63	155,46	9,65	2,43	5,89	152,64	25,13	3,02	0,78	19752,09	11,70					
250 x 85 x 25 x 4,25	14,75	18,79	250	85	25,00	4,25	4,25	1736,46	173,64	9,61	2,42	5,83	168,51	27,73	2,99	1,13	21837,62	11,63					
250 x 85 x 25 x 4,75	16,36	20,84	250	85	25,00	4,75	4,75	1912,44	191,24	9,58	2,42	5,77	183,39	30,17	2,97	1,57	23805,91	11,57					
250 x 85 x 25 x 6,30	21,20	27,00	250	85	25,00	6,30	6,30	2421,27	242,12	9,47	2,41	5,59	223,39	36,70	2,88	3,57	29200,14	11,37					
250 x 100 x 25 x 2,65	10,04	12,79	250	100	25,00	2,65	2,65	1255,39	125,53	9,91	2,98	7,29	169,21	24,11	3,64	0,30	21574,59	12,83					
250 x 100 x 25 x 3,00	11,31	14,41	250	100	25,00	3,00	3,00	1408,08	140,80	9,89	2,98	7,25	188,58	26,86	3,62	0,43	24048,03	12,78					
250 x 100 x 25 x 3,35	12,57	16,01	250	100	25,00	3,35	3,35	1557,77	155,77	9,86	2,98	7,21	207,28	29,52	3,60	0,60	26438,85	12,73					
250 x 100 x 25 x 3,75	13,99	17,83	250	100	25,00	3,75	3,75	1725,17	172,51	9,84	2,98	7,16	227,83	32,43	3,58	0,83	29072,02	12,68					
250 x 100 x 25 x 4,25	15,75	20,06	250	100	25,00	4,25	4,25	1928,96	192,89	9,81	2,97	7,10	252,32	35,90	3,55	1,21	32218,03	12,61					
250 x 100 x 25 x 4,75	17,48	22,27	250	100	25,00	4,75	4,75	2126,71	212,67	9,77	2,97	7,04	275,49	39,18	3,52	1,67	35206,53	12,55					
300 x 85 x 25 x 2,00	7,96	10,14	300	85	25,00	2,00	2,00	1339,09	133,90	11,49	2,20	5,64	93,89	14,91	3,04	0,14	17055,02	13,16					
300 x 85 x 25 x 2,25	8,92	11,37	300	85	25,00	2,25	2,25	1496,84	149,68	11,48	2,20	5,62	104,32	16,57	3,03	0,19	18966,44	13,13					
300 x 85 x 25 x 2,65	10,45	13,32	300	85	25,00	2,65	2,65	1744,85	174,48	11,45	2,20	5,57	120,43	19,12	3,01	0,31	21927,55	13,08					
300 x 85 x 25 x 3,00	11,78	15,01	300	85	25,00	3,00	3,00	1957,43	195,74	11,42	2,20	5,53	133,94	21,26	2,99	0,45	24422,19	13,04					
300 x 85 x 25 x 3,35	13,10	16,68	300	85	25,00	3,35	3,35	2165,90	216,59	11,39	2,20	5,49	146,91	23,32	2,97	0,62	26828,70	12,99					
300 x 85 x 25 x 3,75	14,58	18,58	300	85	25,00	3,75	3,75	2399,14	239,91	11,36	2,20	5,45	161,08	25,57	2,94	0,87	29473,26	12,94					
300 x 85 x 25 x 4,25	16,42	20,91	300	85	25,00	4,25	4,25	2683,21	268,32	11,33	2,20	5,39	177,84	28,22	2,92	1,26	32623,96	12,88					
300 x 85 x 25 x 4,75	18,23	23,22	300	85	25,00	4,75	4,75	2959,01	295,90	11,29	2,20	5,33	193,55	30,71	2,89	1,74	35606,89	12,82					

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.3 (continuação)

Perfil	Dimensões										Eixo x					Eixo y					torção/empenamento			
	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>h</sub>	r <sub>i</sub>	l <sub>k</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	X <sub>g</sub>	X <sub>o</sub>	l <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	l <sub>k</sub>	l <sub>w</sub>	r <sub>o</sub>						
Ue	kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>6</sup>	cm						
300 x 85 x 25 x 6,30	23,67	30,15	300	85	25,00	6,30	6,30	3762,03	250,80	11,17	2,19	5,16	235,82	37,40	2,80	3,98	43837,92	12,62						
300 x 100 x 25 x 2,65	11,08	14,11	300	100	25,00	2,65	2,65	1920,58	128,04	11,67	2,72	6,79	178,97	24,57	3,56	0,33	32115,67	13,96						
300 x 100 x 25 x 3,00	12,49	15,91	300	100	25,00	3,00	3,00	2155,90	143,73	11,64	2,71	6,75	199,46	27,37	3,54	0,48	35827,35	13,91						
300 x 100 x 25 x 3,35	13,88	17,69	300	100	25,00	3,35	3,35	2387,01	159,13	11,62	2,71	6,71	219,25	30,08	3,52	0,66	39422,06	13,87						
300 x 100 x 25 x 3,75	15,46	19,70	300	100	25,00	3,75	3,75	2645,98	176,40	11,59	2,71	6,66	241,02	33,06	3,50	0,92	43389,66	13,82						
300 x 100 x 25 x 4,25	17,42	22,19	300	100	25,00	4,25	4,25	2962,01	197,47	11,55	2,71	6,60	266,95	36,61	3,47	1,33	48142,60	13,75						
300 x 100 x 25 x 4,75	19,34	24,64	300	100	25,00	4,75	4,75	3269,56	217,97	11,52	2,70	6,54	291,49	39,96	3,44	1,85	52671,43	13,69						

Tabela C.4 - Perfil Z enrijecido a 90° - Aço sem revestimento - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões										Eixo x					Eixo y					torção/empenamento			
	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>h</sub>	r <sub>i</sub>	l <sub>k</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	l <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	l <sub>w</sub>	l <sub>k</sub>	l <sub>w</sub>	r <sub>o</sub>							
Z90	kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>6</sup>	cm							
50 x 25 x 10 x 1,20	1,06	1,35	50	25	10,00	1,20	1,20	5,24	2,09	1,97	2,25	0,92	1,29	2,61	6,75	0,74	30,09	9,83						
50 x 25 x 10 x 1,50	1,30	1,65	50	25	10,00	1,50	1,50	6,32	2,53	1,96	2,66	1,10	1,27	3,12	8,11	0,88	29,83	11,66						
50 x 25 x 10 x 2,00	1,68	2,14	50	25	10,00	2,00	2,00	7,93	3,17	1,93	3,24	1,35	1,23	3,86	10,10	1,07	29,38	14,23						
50 x 25 x 10 x 2,25	1,86	2,37	50	25	10,00	2,25	2,25	8,65	3,46	1,91	3,48	1,46	1,21	4,18	10,98	1,15	29,16	15,30						
50 x 25 x 10 x 2,65	2,13	2,72	50	25	10,00	2,65	2,65	9,68	3,87	1,89	3,79	1,60	1,18	4,63	12,22	1,25	28,78	16,75						
50 x 25 x 10 x 3,00	2,36	3,01	50	25	10,00	3,00	3,00	10,46	4,18	1,86	4,00	1,70	1,15	4,95	13,14	1,32	28,45	17,77						
75 x 40 x 15 x 1,20	1,67	2,13	75	40	15,00	1,20	1,20	19,32	5,15	3,02	9,59	2,43	2,12	10,38	25,92	2,99	32,44	0,010						
75 x 40 x 15 x 1,50	2,06	2,63	75	40	15,00	1,50	1,50	23,62	6,30	3,00	11,60	2,96	2,10	12,63	31,60	3,62	32,28	0,020						
75 x 40 x 15 x 2,00	2,70	3,44	75	40	15,00	2,00	2,00	30,33	8,09	2,97	14,64	3,75	2,06	16,10	40,39	4,58	32,00	0,046						
75 x 40 x 15 x 2,25	3,01	3,83	75	40	15,00	2,25	2,25	33,47	8,93	2,96	16,01	4,12	2,04	17,69	44,47	5,01	31,86	0,065						
75 x 40 x 15 x 2,65	3,49	4,44	75	40	15,00	2,65	2,65	38,22	10,19	2,93	18,01	4,66	2,01	20,07	50,58	5,64	31,64	0,104						
75 x 40 x 15 x 3,00	3,89	4,96	75	40	15,00	3,00	3,00	42,08	11,22	2,91	19,57	5,08	1,99	21,98	55,52	6,13	31,44	0,149						
100 x 50 x 17 x 1,20	2,13	2,71	100	50	17,00	1,20	1,20	44,15	8,83	4,03	18,22	3,69	2,59	21,58	56,36	6,01	29,50	0,013						
100 x 50 x 17 x 1,50	2,64	3,36	100	50	17,00	1,50	1,50	54,25	10,85	4,02	22,18	4,50	2,57	26,40	69,10	7,32	29,36	0,025						
100 x 50 x 17 x 2,00	3,47	4,42	100	50	17,00	2,00	2,00	70,26	14,05	3,99	28,27	5,77	2,53	33,95	89,19	9,35	29,13	0,059						
100 x 50 x 17 x 2,25	3,87	4,93	100	50	17,00	2,25	2,25	77,89	15,58	3,97	31,09	6,36	2,51	37,50	98,69	10,29	29,02	0,083						
100 x 50 x 17 x 2,65	4,51	5,74	100	50	17,00	2,65	2,65	89,59	17,92	3,95	35,29	7,25	2,48	42,87	113,18	11,69	28,83	0,134						
100 x 50 x 17 x 3,00	5,05	6,43	100	50	17,00	3,00	3,00	99,30	19,86	3,93	38,66	7,97	2,45	47,27	125,14	12,82	28,66	0,193						
100 x 50 x 17 x 3,35	5,57	7,10	100	50	17,00	3,35	3,35	108,55	21,71	3,91	41,76	8,64	2,42	51,40	136,44	13,86	28,49	0,265						
125 x 50 x 17 x 2,00	3,86	4,92	125	50	17,00	2,00	2,00	118,35	18,94	4,91	28,27	5,77	2,40	43,24	135,74	10,87	21,92	0,065						
125 x 50 x 17 x 2,25	4,31	5,49	125	50	17,00	2,25	2,25	131,41	21,03	4,89	31,09	6,36	2,38	47,79	150,53	11,97	21,81	0,093						
125 x 50 x 17 x 2,65	5,03	6,40	125	50	17,00	2,65	2,65	151,52	24,24	4,87	35,29	7,25	2,35	54,68	173,21	13,61	21,63	0,150						
125 x 50 x 17 x 3,00	5,63	7,18	125	50	17,00	3,00	3,00	168,35	26,94	4,84	38,66	7,97	2,32	60,34	192,08	14,93	21,47	0,215						
125 x 50 x 17 x 3,35	6,23	7,94	125	50	17,00	3,35	3,35	184,45	29,51	4,82	41,76	8,64	2,29	65,65	210,06	16,15	21,31	0,297						

Tabela C.4 (Continuação)

Perfil	m	A	Dimensões					Eixo x				Eixo y				Eixos principais				torção/empenamento			
			b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>n</sub>	r <sub>i</sub>	I <sub>x</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>xy</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	α <sub>p</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>o</sub>			
125 x 50 x 20 x 3,75	7,08	9,01	125	50	20,00	3,75	3,75	206,34	33,01	4,78	49,78	10,34	2,35	75,90	237,09	19,03	22,06	0,422	1417,56	5,33			
150 x 60 x 20 x 2,00	4,66	5,94	150	60	20,00	2,00	2,00	207,59	27,68	5,91	49,80	8,44	2,90	75,99	238,24	19,15	21,96	0,079	1973,35	6,58			
150 x 60 x 20 x 2,25	5,21	6,64	150	60	20,00	2,25	2,25	231,03	30,80	5,90	54,98	9,34	2,88	84,24	264,84	21,17	21,87	0,112	2181,92	6,64			
150 x 60 x 20 x 2,65	6,09	7,75	150	60	20,00	2,65	2,65	267,39	35,65	5,87	62,82	10,71	2,85	96,88	305,99	24,22	21,72	0,181	2499,28	6,83			
150 x 60 x 20 x 3,00	6,84	8,71	150	60	20,00	3,00	3,00	298,07	39,74	5,85	69,22	11,83	2,82	107,39	340,57	26,72	21,59	0,261	2760,89	7,15			
150 x 60 x 20 x 3,35	7,57	9,65	150	60	20,00	3,35	3,35	327,70	43,69	5,83	75,22	12,90	2,79	117,39	373,84	29,07	21,46	0,361	3007,95	7,60			
150 x 60 x 20 x 3,75	8,40	10,70	150	60	20,00	3,75	3,75	360,28	48,04	5,80	81,58	14,03	2,76	128,21	410,29	31,57	21,31	0,501	3273,04	8,14			
150 x 60 x 20 x 4,25	9,41	11,99	150	60	20,00	4,25	4,25	399,11	53,22	5,77	88,81	15,35	2,72	140,84	453,50	34,42	21,12	0,721	3579,42	8,76			
150 x 60 x 20 x 4,75	10,39	13,24	150	60	20,00	4,75	4,75	435,87	58,12	5,74	95,27	16,53	2,68	152,50	494,16	36,97	20,92	0,995	3859,14	9,44			
200 x 75 x 20 x 2,00	5,92	7,54	200	75	20,00	2,00	2,00	467,42	46,74	7,88	89,55	12,10	3,45	151,43	520,62	36,35	19,36	0,100	6269,45	12,45			
200 x 75 x 20 x 2,25	6,63	8,44	200	75	20,00	2,25	2,25	521,40	52,14	7,86	99,17	13,42	3,43	168,30	580,27	40,29	19,28	0,142	6955,17	13,17			
200 x 75 x 25 x 2,65	7,96	10,14	200	75	25,00	2,65	2,65	621,67	62,17	7,83	127,73	17,34	3,55	209,22	698,38	51,02	20,13	0,237	9114,36	13,96			
200 x 75 x 25 x 3,00	8,96	11,41	200	75	25,00	3,00	3,00	695,55	69,55	7,81	141,57	19,26	3,52	232,98	780,50	56,62	20,03	0,342	10122,78	14,74			
200 x 75 x 25 x 3,35	9,94	12,66	200	75	25,00	3,35	3,35	767,54	76,75	7,79	154,74	21,10	3,50	255,88	860,33	61,95	19,93	0,473	11088,78	15,55			
200 x 75 x 25 x 3,75	11,05	14,08	200	75	25,00	3,75	3,75	847,53	84,75	7,76	169,00	23,11	3,47	281,00	948,79	67,74	19,82	0,659	12142,07	16,38			
200 x 75 x 25 x 4,25	12,41	15,81	200	75	25,00	4,25	4,25	944,12	94,41	7,73	185,64	25,47	3,43	310,85	1055,24	74,52	19,67	0,951	13384,69	17,22			
200 x 75 x 25 x 4,75	13,75	17,52	200	75	25,00	4,75	4,75	1036,95	103,69	7,69	201,01	27,68	3,39	339,02	1157,15	80,80	19,52	1,316	14547,60	18,07			
200 x 75 x 30 x 6,30	18,23	23,22	200	75	30,00	6,30	6,30	1334,38	133,44	7,58	270,65	37,67	3,41	447,34	1497,49	107,54	20,03	3,069	20067,02	18,92			
250 x 85 x 25 x 2,00	7,17	9,14	250	85	25,00	2,00	2,00	871,52	69,72	9,77	138,72	16,51	3,90	254,77	951,39	58,85	17,41	0,122	15549,20	21,72			
250 x 85 x 25 x 2,25	8,04	10,24	250	85	25,00	2,25	2,25	973,59	77,89	9,75	153,98	18,36	3,88	283,66	1062,19	65,38	17,35	0,173	17286,59	22,59			
250 x 85 x 25 x 2,65	9,41	11,99	250	85	25,00	2,65	2,65	1133,79	90,70	9,72	177,46	21,21	3,85	328,57	1235,79	75,45	17,25	0,280	19975,60	23,46			
250 x 85 x 25 x 3,00	10,60	13,51	250	85	25,00	3,00	3,00	1270,81	101,67	9,70	197,08	23,60	3,82	366,53	1384,00	83,89	17,16	0,405	22238,44	24,34			
250 x 85 x 25 x 3,35	11,78	15,01	250	85	25,00	3,35	3,35	1404,92	112,39	9,68	215,85	25,91	3,79	403,27	1528,78	91,99	17,07	0,561	24418,96	25,24			
250 x 85 x 25 x 3,75	13,11	16,70	250	85	25,00	3,75	3,75	1554,63	124,37	9,65	236,29	28,43	3,76	443,78	1690,09	100,83	16,97	0,782	26812,22	26,14			
250 x 85 x 25 x 4,25	14,75	18,79	250	85	25,00	4,25	4,25	1736,46	138,92	9,61	260,34	31,41	3,72	492,22	1885,53	111,26	16,85	1,130	29659,10	27,04			
250 x 85 x 25 x 4,75	16,36	20,84	250	85	25,00	4,75	4,75	1912,44	153,00	9,58	282,76	34,22	3,68	538,26	2074,17	121,03	16,72	1,566	32349,46	27,95			
250 x 85 x 30 x 6,30	21,69	27,63	250	85	30,00	6,30	6,30	2481,17	198,49	9,48	381,34	46,59	3,72	714,53	2701,25	161,26	17,12	3,652	44495,90	28,85			

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.4 (Continuação)

Perfil	m		A	Dimensões				Eixo x			Eixo y			Eixos principais				torção/empenamento				
	kg/m	cm <sup>2</sup>		b <sub>w</sub>	b <sub>r</sub>	D	t = t <sub>0</sub>	r <sub>i</sub>	k	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>xy</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	α <sub>p</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>	
Z90																						
300 x 85 x 2 x 2,00	7,96	10,14	300	85	25,00	2,00	2,00	1339,09	89,27	11,49	138,72	16,51	3,70	308,07	1413,53	64,28	13,59	0,135	23233,5	12,07		
300 x 85 x 2 x 2,25	8,92	11,37	300	85	25,00	2,25	2,25	1496,84	99,79	11,48	153,98	18,36	3,68	343,06	1579,41	71,41	13,53	0,192	25840,3	12,09		
300 x 85 x 2 x 2,65	10,45	13,32	300	85	25,00	2,65	1744,85	116,32	11,45	177,46	21,21	3,65	397,47	1839,88	82,43	13,45	0,311	29879,8	12,18			
300 x 85 x 2 x 3,00	11,78	15,01	300	85	25,00	3,00	1957,43	130,50	11,42	197,08	23,60	3,62	443,49	2062,85	91,66	13,37	0,450	33284,0	12,35			
300 x 85 x 2 x 3,35	13,10	16,68	300	85	25,00	3,35	2163,90	144,39	11,39	215,85	25,91	3,60	488,05	2281,23	100,52	13,30	0,623	36569,0	12,60			
300 x 85 x 2 x 3,75	14,58	18,58	300	85	25,00	3,75	2399,14	159,94	11,36	236,29	28,43	3,57	537,22	2525,23	110,20	13,21	0,870	40180,0	12,92			
300 x 85 x 2 x 4,25	16,42	20,91	300	85	25,00	4,25	2683,21	178,88	11,33	260,34	31,41	3,53	596,06	2821,90	121,64	13,10	1,258	44483,7	13,29			
300 x 85 x 2 x 4,75	18,23	23,22	300	85	25,00	4,75	2959,01	197,27	11,29	282,76	34,22	3,49	652,04	3109,41	132,35	12,99	1,744	48559,7	13,73			
300 x 85 x 3 x 6,30	24,16	30,78	300	85	30,00	6,30	3856,59	257,11	11,19	381,34	46,59	3,52	868,59	4061,59	176,34	13,28	4,068	66673,3	14,20			

Tabela C.5 - Perfil Z enrijecido a 45° - Aço sem revestimento - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	m		A	Dimensões				Eixo x			Eixo y			Eixos principais				torção/empenamento				
	kg/m	cm <sup>2</sup>		b <sub>w</sub>	b <sub>r</sub>	D	t = t <sub>0</sub>	r <sub>i</sub>	k	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>xy</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	α <sub>p</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>	
Z45																						
100 x 50 x 17 x 1,20	2,16	2,75	100	50	17	1,20	1,20	45,64	9,13	4,08	21,69	3,52	2,81	23,86	60,36	6,97	31,67	0,013	348,63	4,95		
100 x 50 x 17 x 1,50	2,68	3,41	100	50	17	1,50	1,50	56,32	11,26	4,06	26,76	4,35	2,80	29,47	74,51	8,57	31,68	0,026	427,86	4,93		
100 x 50 x 17 x 2,00	3,54	4,51	100	50	17	2,00	2,00	73,48	14,70	4,04	34,91	5,69	2,78	38,52	97,27	11,11	31,70	0,061	553,20	4,90		
100 x 50 x 17 x 2,25	3,96	5,05	100	50	17	2,25	2,25	81,76	16,35	4,02	38,84	6,34	2,77	42,91	108,28	12,32	31,71	0,087	612,81	4,89		
100 x 50 x 17 x 2,65	4,63	5,90	100	50	17	2,65	2,65	94,62	18,92	4,00	44,94	7,36	2,76	49,74	125,37	14,18	31,73	0,142	704,06	4,86		
100 x 50 x 17 x 3,00	5,21	6,64	100	50	17	3,00	3,00	105,46	21,09	3,99	50,09	8,22	2,75	55,52	139,82	15,73	31,75	0,205	779,84	4,84		
100 x 50 x 17 x 3,35	5,78	7,36	100	50	17	3,35	3,35	115,93	23,19	3,97	55,06	9,05	2,73	61,13	153,78	17,21	31,77	0,285	851,94	4,82		
125 x 50 x 17 x 2,00	3,93	5,01	125	50	17	2,00	2,00	123,16	19,71	4,96	34,91	5,69	2,64	48,91	144,91	13,16	23,97	0,068	906,16	5,62		
125 x 50 x 17 x 2,25	4,41	5,61	125	50	17	2,25	2,25	137,24	21,96	4,94	38,84	6,34	2,63	54,51	161,47	14,61	23,97	0,097	1004,94	5,60		
125 x 50 x 17 x 2,65	5,15	6,57	125	50	17	2,65	2,65	159,17	25,47	4,92	44,94	7,36	2,62	63,24	187,27	16,84	23,96	0,157	1156,69	5,58		
125 x 50 x 17 x 3,00	5,80	7,39	125	50	17	3,00	3,00	177,77	28,44	4,91	50,09	8,22	2,60	70,65	209,15	18,71	23,95	0,228	1283,27	5,55		
125 x 50 x 17 x 3,35	6,44	8,20	125	50	17	3,35	3,35	195,81	31,33	4,89	55,06	9,05	2,59	77,85	230,38	20,49	23,94	0,316	1404,19	5,53		
125 x 50 x 20 x 3,75	7,33	9,34	125	50	20	3,75	3,75	220,97	35,36	4,86	68,61	10,92	2,71	92,31	264,48	25,11	25,23	0,453	1763,60	5,57		
150 x 60 x 20 x 2,00	4,73	6,03	150	60	20	2,00	2,00	214,96	28,66	5,97	60,37	8,22	3,16	84,89	252,47	22,86	23,84	0,082	2263,16	6,76		
150 x 60 x 20 x 2,25	5,31	6,76	150	60	20	2,25	2,25	239,92	31,99	5,96	67,29	9,17	3,16	94,75	281,78	25,43	23,83	0,116	2515,89	6,74		
150 x 60 x 20 x 2,65	6,21	7,92	150	60	20	2,65	2,65	279,00	37,20	5,94	78,09	10,67	3,14	110,21	327,66	29,43	23,83	0,189	2907,01	6,72		
150 x 60 x 20 x 3,00	7,00	8,92	150	60	20	3,00	3,00	312,32	41,64	5,92	87,27	11,94	3,13	123,39	366,79	32,80	23,82	0,274	3236,12	6,69		
150 x 60 x 20 x 3,35	7,78	9,91	150	60	20	3,35	3,35	344,85	45,98	5,90	96,19	13,18	3,12	136,27	404,99	36,05	23,81	0,380	3553,23	6,67		
150 x 60 x 20 x 3,75	8,66	11,03	150	60	20	3,75	3,75	381,05	50,81	5,88	106,07	14,57	3,10	150,62	447,50	39,62	23,80	0,532	3901,28	6,65		
150 x 60 x 20 x 4,25	9,74	12,41	150	60	20	4,25	4,25	424,86	56,65	5,85	117,97	16,24	3,08	168,01	498,95	43,88	23,80	0,772	4315,32	6,61		

Tabela C.5 - Perfil Z enrijicido a 45° - Aço sem revestimento - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões													Eixo X					Eixo Y					torção/empenamento			
	Z45	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>0</sub>	r <sub>1</sub>	l <sub>k</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	l <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	l <sub>ky</sub>	l <sub>x</sub>	l <sub>y</sub>	l <sub>z</sub>	l <sub>z</sub>	α <sub>p</sub>	l <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	I <sub>0</sub>				
																								kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm
150 x 60 x 20 x 4,75	10,81	13,77	150	60	20	4,75	4,75	467,08	62,28	5,82	129,38	17,85	3,07	184,79	548,55	47,91	23,79	1,074	4706,62	6,58							
200 x 75 x 20 x 2,00	5,99	7,63	200	75	20	2,00	2,00	479,72	47,97	7,93	103,72	11,73	3,69	164,81	541,73	41,71	20,62	0,103	6955,24	8,74							
200 x 75 x 20 x 2,25	6,72	8,56	200	75	20	2,25	2,25	536,37	53,64	7,92	115,79	13,11	3,68	184,23	605,66	46,51	20,61	0,146	7749,54	8,73							
200 x 75 x 25 x 2,65	8,09	10,30	200	75	25	2,65	2,65	643,82	64,38	7,91	155,54	16,95	3,89	234,30	738,06	61,30	21,91	0,245	10498,69	8,81							
200 x 75 x 25 x 3,00	9,12	11,62	200	75	25	3,00	3,00	722,65	72,26	7,89	174,27	19,02	3,87	262,96	828,36	68,56	21,90	0,355	11730,61	8,79							
200 x 75 x 25 x 3,35	10,15	12,92	200	75	25	3,35	3,35	800,06	80,01	7,87	192,60	21,05	3,86	291,10	917,03	75,63	21,89	0,493	12928,20	8,76							
200 x 75 x 25 x 3,75	11,31	14,40	200	75	25	3,75	3,75	886,80	88,68	7,85	213,06	23,32	3,85	322,64	1016,38	83,48	21,88	0,690	14255,53	8,74							
200 x 75 x 25 x 4,25	12,74	16,23	200	75	25	4,25	4,25	992,66	99,27	7,82	237,89	26,09	3,83	361,13	1137,60	92,94	21,87	1,002	15853,84	8,71							
200 x 75 x 25 x 4,75	14,16	18,04	200	75	25	4,75	4,75	1095,68	109,57	7,79	261,93	28,78	3,81	398,59	1255,57	102,03	21,86	1,396	17385,95	8,67							
200 x 75 x 30 x 6,30	18,95	24,15	200	75	30	6,30	6,30	1435,93	143,59	7,71	381,48	40,59	3,97	552,35	1672,28	145,12	23,17	3,315	25326,36	8,68							
250 x 85 x 25 x 2,00	7,25	9,23	250	85	25	2,00	2,00	892,39	71,39	9,83	161,45	15,83	4,18	277,15	985,59	68,24	18,59	0,124	17401,66	10,69							
250 x 85 x 25 x 2,25	8,13	10,36	250	85	25	2,25	2,25	998,85	79,91	9,82	180,43	17,71	4,17	310,11	1103,08	76,20	18,58	0,177	19418,27	10,67							
250 x 85 x 25 x 2,65	9,54	12,16	250	85	25	2,65	2,65	1166,87	93,35	9,80	210,25	20,67	4,16	362,07	1288,46	88,67	18,56	0,288	22573,98	10,64							
250 x 85 x 25 x 3,00	10,77	13,72	250	85	25	3,00	3,00	1311,56	104,92	9,78	235,81	23,21	4,15	406,77	1488,05	99,32	18,55	0,417	25264,61	10,62							
250 x 85 x 25 x 3,35	11,99	15,27	250	85	25	3,35	3,35	1454,08	116,33	9,76	260,87	25,70	4,13	450,76	1605,22	109,72	18,54	0,580	27890,24	10,60							
250 x 85 x 25 x 3,75	13,37	17,03	250	85	25	3,75	3,75	1614,31	129,15	9,74	288,89	28,50	4,12	500,18	1781,89	121,32	18,52	0,813	30812,53	10,57							
250 x 85 x 25 x 4,25	15,08	19,21	250	85	25	4,25	4,25	1810,68	144,85	9,71	323,02	31,93	4,10	560,68	1998,32	135,38	18,50	1,181	34349,63	10,54							
250 x 85 x 25 x 4,75	16,77	21,37	250	85	25	4,75	4,75	2002,70	160,22	9,68	356,16	35,26	4,08	619,77	2209,91	148,96	18,49	1,645	37760,47	10,51							
250 x 85 x 30 x 6,30	22,42	28,56	250	85	30	6,30	6,30	2637,93	211,03	9,61	514,63	49,49	4,25	858,68	2941,72	210,84	19,48	3,898	54497,80	10,51							
300 x 85 x 25 x 2,00	8,03	10,23	300	85	25	2,00	2,00	1367,81	91,19	11,56	161,45	15,83	3,97	334,67	1454,43	74,82	14,51	0,138	26081,91	12,23							
300 x 85 x 25 x 2,25	9,02	11,49	300	85	25	2,25	2,25	1531,78	102,12	11,55	180,43	17,71	3,96	374,53	1628,64	83,57	14,50	0,196	29115,16	12,21							
300 x 85 x 25 x 2,65	10,58	13,48	300	85	25	2,65	2,65	1790,92	119,39	11,53	210,25	20,67	3,95	437,41	1903,89	97,29	14,48	0,319	33866,75	12,18							
300 x 85 x 25 x 3,00	11,95	15,22	300	85	25	3,00	3,00	2014,44	134,30	11,51	235,81	23,21	3,94	491,53	2141,24	109,01	14,46	0,462	37923,02	12,16							
300 x 85 x 25 x 3,35	13,30	16,94	300	85	25	3,35	3,35	2234,97	149,00	11,49	260,87	25,70	3,92	544,82	2375,35	120,49	14,45	0,643	41885,94	12,14							
300 x 85 x 25 x 3,75	14,84	18,90	300	85	25	3,75	3,75	2483,35	165,56	11,46	288,89	28,50	3,91	604,72	2638,95	133,29	14,43	0,901	46302,22	12,11							
300 x 85 x 25 x 4,25	16,75	21,33	300	85	25	4,25	4,25	2788,37	185,89	11,43	323,02	31,93	3,89	678,09	2962,57	148,82	14,41	1,309	51655,99	12,08							
300 x 85 x 25 x 4,75	18,64	23,74	300	85	25	4,75	4,75	3087,37	205,82	11,40	356,16	35,26	3,87	749,82	3279,68	163,85	14,39	1,824	56827,84	12,04							
300 x 85 x 30 x 6,30	24,89	31,71	300	85	30	6,30	6,30	4080,10	272,01	11,34	514,63	49,49	4,03	1042,00	4362,29	232,44	15,15	4,314	81938,46	12,04							

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.6 - Perfil cartola - Aço sem revestimento - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões										Eixo x						Eixo y						torção/empenamento		
	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>0</sub>	r <sub>f</sub>	k	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	I <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	Y <sub>0</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>						
50 x 100 x 20 x 2,00	3,56	4,54	50	100	20	2,00	2,00	16,90	5,39	1,93	84,91	12,49	4,33	1,87	1,77	0,060	205,67	5,06							
50 x 100 x 20 x 2,25	3,98	5,07	50	100	20	2,25	2,25	18,62	5,94	1,92	93,93	13,86	4,31	1,86	1,75	0,085	226,96	5,03							
50 x 100 x 20 x 2,65	4,63	5,90	50	100	20	2,65	2,65	21,22	6,76	1,90	107,57	15,97	4,27	1,86	1,73	0,138	259,14	4,98							
50 x 100 x 20 x 3,00	5,19	6,61	50	100	20	3,00	3,00	23,32	7,43	1,88	118,73	17,72	4,24	1,86	1,71	0,198	285,46	4,94							
50 x 100 x 20 x 3,35	5,73	7,30	50	100	20	3,35	3,35	25,26	8,04	1,86	129,13	19,37	4,21	1,86	1,69	0,273	310,12	4,90							
67 x 134 x 30 x 3,00	7,26	9,25	67	134	30	3,00	3,00	62,89	15,27	2,61	317,95	33,82	5,86	2,58	2,43	0,277	1309,74	6,86							
67 x 134 x 30 x 3,75	8,93	11,38	67	134	30	3,75	3,75	75,13	18,23	2,57	382,55	41,02	5,80	2,58	2,39	0,533	1567,35	6,78							
67 x 134 x 30 x 4,75	11,07	14,10	67	134	30	4,75	4,75	89,44	21,68	2,52	458,94	49,75	5,71	2,57	2,34	1,059	1872,04	6,66							
75 x 75 x 20 x 2,00	3,95	5,04	75	75	20	2,00	2,00	39,80	9,35	2,81	59,82	10,78	3,45	3,24	3,14	0,067	288,90	5,45							
75 x 75 x 20 x 2,25	4,42	5,63	75	75	20	2,25	2,25	44,06	10,35	2,80	66,16	11,97	3,43	3,24	3,13	0,095	319,39	5,42							
75 x 75 x 20 x 2,65	5,15	6,56	75	75	20	2,65	2,65	50,56	11,86	2,78	75,76	13,81	3,40	3,24	3,11	0,153	365,77	5,38							
75 x 75 x 20 x 3,00	5,78	7,36	75	75	20	3,00	3,00	55,93	13,12	2,76	83,61	15,34	3,37	3,24	3,09	0,221	403,99	5,34							
75 x 75 x 20 x 3,35	6,39	8,14	75	75	20	3,35	3,35	61,01	14,30	2,74	90,94	16,79	3,34	3,23	3,07	0,304	440,09	5,30							
75 x 100 x 20 x 2,00	4,35	5,54	75	100	20	2,00	2,00	44,29	9,75	2,83	108,92	16,02	4,44	2,96	2,86	0,074	584,03	5,99							
75 x 100 x 20 x 2,25	4,86	6,19	75	100	20	2,25	2,25	49,06	10,80	2,81	120,80	17,83	4,42	2,96	2,85	0,104	647,25	5,96							
75 x 100 x 20 x 2,65	5,67	7,22	75	100	20	2,65	2,65	56,36	12,40	2,79	138,97	20,63	4,39	2,95	2,82	0,169	744,16	5,92							
75 x 100 x 20 x 3,00	6,37	8,11	75	100	20	3,00	3,00	62,41	13,72	2,77	154,01	22,99	4,36	2,95	2,80	0,243	824,78	5,88							
75 x 100 x 20 x 3,35	7,05	8,98	75	100	20	3,35	3,35	68,15	14,97	2,76	168,25	25,24	4,33	2,95	2,78	0,335	901,62	5,84							
80 x 160 x 30 x 3,00	8,48	10,81	80	160	30	3,00	3,00	102,02	20,13	3,07	512,07	47,86	6,88	2,93	2,78	0,324	3266,03	8,03							
80 x 160 x 30 x 3,75	10,46	13,33	80	160	30	3,75	3,75	122,62	24,17	3,03	619,83	58,34	6,82	2,93	2,74	0,624	3937,63	7,95							
80 x 160 x 30 x 4,75	13,00	16,57	80	160	30	4,75	4,75	147,21	28,99	2,98	750,31	71,29	6,73	2,92	2,68	1,245	4750,88	7,83							
100 x 50 x 20 x 2,00	4,35	5,54	100	50	20	2,00	2,00	69,87	13,50	3,55	32,24	7,50	2,41	4,82	4,73	0,074	268,29	6,39							
100 x 50 x 20 x 2,25	4,86	6,19	100	50	20	2,25	2,25	77,49	14,97	3,54	35,56	8,32	2,40	4,82	4,71	0,104	295,95	6,36							
100 x 50 x 20 x 2,65	5,67	7,22	100	50	20	2,65	2,65	89,17	17,22	3,51	40,53	9,57	2,37	4,82	4,69	0,169	337,72	6,32							
100 x 50 x 20 x 3,00	6,37	8,11	100	50	20	3,00	3,00	98,90	19,09	3,49	44,54	10,61	2,34	4,82	4,67	0,243	371,82	6,29							
100 x 50 x 20 x 3,35	7,05	8,98	100	50	20	3,35	3,35	108,17	20,88	3,47	48,24	11,58	2,32	4,82	4,66	0,335	403,73	6,25							

Tabela C.7 - Perfil U enrijecido - Aço zincado<sup>a</sup> - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões													Eixo x					Eixo y					torção/empenamento		
	Ue	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	D	t = t <sub>n</sub>	r <sub>i</sub>	I <sub>x</sub>	W <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	X <sub>g</sub>	x <sub>0</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	r <sub>0</sub>							
	kg/m	cm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm	cm	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>6</sup>	cm							
75 x 40 x 15 x 0,65	0,87	1,11	75	40	15,00	0,614	0,65	10,31	2,75	3,05	1,51	3,63	2,79	1,12	1,58	0,001	42,14	5,00								
75 x 40 x 15 x 0,80	1,08	1,37	75	40	15,00	0,764	0,80	12,69	3,38	3,04	1,51	3,62	3,42	1,37	1,58	0,003	51,53	4,98								
75 x 40 x 15 x 0,95	1,28	1,64	75	40	15,00	0,914	0,95	15,02	4,01	3,03	1,51	3,60	4,03	1,62	1,57	0,005	60,59	4,96								
75 x 40 x 15 x 1,25	1,69	2,15	75	40	15,00	1,214	1,25	19,52	5,20	3,01	1,51	3,56	5,19	2,08	1,55	0,011	77,72	4,92								
75 x 40 x 15 x 1,55	2,08	2,65	75	40	15,00	1,514	1,55	23,80	6,35	3,00	1,51	3,53	6,27	2,51	1,54	0,020	93,58	4,88								
75 x 40 x 15 x 1,95	2,59	3,30	75	40	15,00	1,914	1,95	29,20	7,79	2,98	1,50	3,48	7,60	3,04	1,52	0,040	112,86	4,82								
75 x 40 x 15 x 2,30	3,02	3,85	75	40	15,00	2,264	2,30	33,63	8,97	2,96	1,50	3,43	8,66	3,46	1,50	0,066	128,05	4,77								
75 x 40 x 15 x 2,70	3,50	4,46	75	40	15,00	2,664	2,70	38,35	10,23	2,93	1,50	3,39	9,75	3,90	1,48	0,105	143,60	4,72								
90 x 40 x 12 x 0,95	1,35	1,72	90	40	12,00	0,914	0,95	22,35	4,97	3,61	1,31	3,19	3,93	1,46	1,51	0,005	70,23	5,05								
90 x 40 x 12 x 1,25	1,77	2,26	90	40	12,00	1,214	1,25	29,09	6,46	3,59	1,31	3,15	5,05	1,88	1,50	0,011	90,19	5,01								
90 x 40 x 12 x 1,55	2,19	2,79	90	40	12,00	1,514	1,55	35,53	7,90	3,57	1,31	3,12	6,10	2,27	1,48	0,021	108,73	4,97								
90 x 40 x 12 x 2,30	3,18	4,05	90	40	12,00	2,264	2,30	50,39	11,20	3,53	1,30	3,02	8,38	3,11	1,44	0,069	149,21	4,86								
90 x 40 x 12 x 2,70	3,69	4,70	90	40	12,00	2,664	2,70	57,60	12,80	3,50	1,30	2,98	9,42	3,49	1,42	0,111	167,60	4,81								
100 x 50 x 17 x 0,95	1,64	2,08	100	50	17,00	0,914	0,95	34,16	6,83	4,05	1,79	4,32	7,88	2,46	1,95	0,006	192,83	6,23								
100 x 50 x 17 x 1,25	2,15	2,74	100	50	17,00	1,214	1,25	44,61	8,92	4,03	1,79	4,28	10,22	3,18	1,93	0,013	249,16	6,19								
100 x 50 x 17 x 1,55	2,66	3,39	100	50	17,00	1,514	1,55	54,69	10,94	4,02	1,79	4,24	12,43	3,87	1,91	0,026	302,26	6,15								
100 x 50 x 17 x 1,95	3,33	4,24	100	50	17,00	1,914	1,95	67,55	13,51	3,99	1,78	4,19	15,19	4,72	1,89	0,052	368,18	6,09								
100 x 50 x 17 x 2,30	3,89	4,96	100	50	17,00	2,264	2,30	78,28	15,66	3,97	1,78	4,15	17,43	5,42	1,87	0,085	421,49	6,04								
100 x 50 x 17 x 2,70	4,53	5,77	100	50	17,00	2,664	2,70	89,94	17,99	3,95	1,78	4,10	19,81	6,15	1,85	0,136	477,62	5,99								
127 x 50 x 17 x 0,95	1,83	2,33	127	50	17,00	0,914	0,95	59,30	9,34	5,04	1,60	3,98	8,56	2,52	1,92	0,006	307,83	6,70								
127 x 50 x 17 x 1,25	2,41	3,07	127	50	17,00	1,214	1,25	77,59	12,22	5,03	1,60	3,94	11,09	3,27	1,90	0,015	398,62	6,66								
127 x 50 x 17 x 1,55	2,98	3,80	127	50	17,00	1,514	1,55	95,30	15,01	5,01	1,60	3,90	13,49	3,97	1,88	0,029	484,60	6,62								
127 x 50 x 17 x 1,95	3,73	4,75	127	50	17,00	1,914	1,95	118,03	18,59	4,98	1,60	3,86	16,50	4,85	1,86	0,058	592,01	6,57								
127 x 50 x 17 x 2,30	4,37	5,57	127	50	17,00	2,264	2,30	137,10	21,59	4,96	1,60	3,81	18,95	5,57	1,84	0,095	679,46	6,52								
127 x 50 x 17 x 2,70	5,09	6,48	127	50	17,00	2,664	2,70	157,97	24,88	4,94	1,60	3,77	21,54	6,33	1,82	0,153	772,23	6,47								

# Anexo C - Seções transversais dos perfis formados a frio indicados na ABNT NBR 6355:2012

Tabela C.7 (continuação)

Perfil	m kg/m	A cm <sup>2</sup>	Dimensões						Eixo x				Eixo y				torção/empenamento		
			b <sub>w</sub> mm	b <sub>t</sub> mm	D mm	t = t <sub>n</sub> mm	r <sub>i</sub> mm	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	X <sub>g</sub> cm	x <sub>0</sub> cm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>w</sub> cm <sup>6</sup>	r <sub>0</sub> cm	
140 x 40 x 12 x 0,95	1,71	2,17	140	40	12,00	0,914	0,95	62,73	8,96	5,37	1,05	2,68	4,51	1,53	1,44	0,006	179,14	6,17	
140 x 40 x 12 x 1,25	2,25	2,86	140	40	12,00	1,214	1,25	81,97	11,71	5,35	1,05	2,65	5,80	1,96	1,42	0,014	231,02	6,14	
140 x 40 x 12 x 1,55	2,78	3,54	140	40	12,00	1,514	1,55	100,54	14,36	5,33	1,05	2,62	7,00	2,37	1,41	0,027	279,67	6,10	
140 x 40 x 12 x 2,30	4,07	5,19	140	40	12,00	2,264	2,30	144,10	20,59	5,27	1,04	2,53	9,64	3,26	1,36	0,089	387,92	6,00	
140 x 40 x 12 x 2,70	4,74	6,03	140	40	12,00	2,664	2,70	165,68	23,67	5,24	1,04	2,49	10,83	3,66	1,34	0,143	438,27	5,95	
200 x 40 x 12 x 0,95	2,14	2,72	200	40	12,00	0,914	0,95	147,74	14,77	7,37	0,85	2,27	4,95	1,57	1,35	0,008	395,46	7,82	
200 x 40 x 12 x 1,25	2,82	3,59	200	40	12,00	1,214	1,25	193,57	19,36	7,34	0,85	2,24	6,36	2,02	1,33	0,018	511,10	7,79	
200 x 40 x 12 x 1,55	3,49	4,45	200	40	12,00	1,514	1,55	238,10	23,81	7,31	0,85	2,21	7,69	2,44	1,31	0,034	620,09	7,75	
200 x 40 x 12 x 2,30	5,14	6,54	200	40	12,00	2,264	2,30	343,76	34,38	7,25	0,85	2,13	10,57	3,36	1,27	0,112	864,79	7,66	
200 x 40 x 12 x 2,70	5,99	7,63	200	40	12,00	2,664	2,70	396,85	39,68	7,21	0,85	2,09	11,88	3,78	1,25	0,180	979,88	7,61	
250 x 40 x 12 x 0,95	2,50	3,18	250	40	12,00	0,914	0,95	255,80	20,46	8,97	0,73	2,02	5,20	1,59	1,28	0,009	653,67	9,28	
250 x 40 x 12 x 1,25	3,30	4,20	250	40	12,00	1,214	1,25	335,68	26,85	8,94	0,73	1,99	6,69	2,05	1,26	0,021	845,58	9,25	
250 x 40 x 12 x 1,55	4,09	5,21	250	40	12,00	1,514	1,55	413,56	33,08	8,91	0,74	1,96	8,07	2,47	1,24	0,040	1026,83	9,21	
250 x 40 x 12 x 2,30	6,03	7,68	250	40	12,00	2,264	2,30	599,56	47,97	8,84	0,74	1,89	11,10	3,41	1,20	0,131	1435,30	9,12	
250 x 40 x 12 x 2,70	7,04	8,96	250	40	12,00	2,664	2,70	693,73	55,50	8,80	0,75	1,85	12,47	3,83	1,18	0,212	1628,28	9,07	
300 x 40 x 12 x 0,95	2,86	3,64	300	40	12,00	0,914	0,95	403,83	26,92	10,54	0,64	1,82	5,38	1,60	1,22	0,010	986,66	10,76	
300 x 40 x 12 x 1,25	3,77	4,81	300	40	12,00	1,214	1,25	530,58	35,37	10,51	0,65	1,79	6,93	2,07	1,20	0,024	1277,02	10,73	
300 x 40 x 12 x 1,55	4,68	5,96	300	40	12,00	1,514	1,55	654,49	43,63	10,47	0,65	1,76	8,36	2,50	1,18	0,046	1551,59	10,69	
300 x 40 x 12 x 2,30	6,91	8,81	300	40	12,00	2,264	2,30	951,86	63,46	10,40	0,66	1,70	11,49	3,44	1,14	0,150	2171,70	10,60	
300 x 40 x 12 x 2,70	8,08	10,29	300	40	12,00	2,664	2,70	1103,27	73,55	10,35	0,67	1,66	12,90	3,87	1,12	0,243	2463,43	10,54	

<sup>a</sup> Espessura do revestimento metálico considerada no cálculo: tr = 0,036 mm.

Tabela C.8 - Perfil cartola - Aço zincado\* - Dimensões, massas e propriedades geométricas

Perfil	Dimensões					Eixo x					Eixo y					torção/empenamento			
	m	A	b <sub>w</sub>	b <sub>r</sub>	D	t = t <sub>h</sub>	r <sub>i</sub>	k	W <sub>x</sub>	I <sub>x</sub>	r <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	r <sub>y</sub>	Y <sub>g</sub>	Y <sub>0</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>w</sub>	f <sub>0</sub>
Cr																			
20 x 30 x 12 x 0,95	0,63	0,80	20	30	12	0,914	0,95	0,52	0,48	0,80	0,80	1,75	0,67	1,48	0,93	0,89	0,002	0,53	1,90
20 x 30 x 12 x 1,25	0,82	1,04	20	30	12	1,214	1,25	0,65	0,61	0,79	0,79	2,20	0,85	1,45	0,93	0,87	0,005	0,66	1,87
20 x 30 x 12 x 1,55	1,00	1,27	20	30	12	1,514	1,55	0,76	0,71	0,77	0,77	2,59	1,02	1,43	0,93	0,86	0,010	0,77	1,84
20 x 30 x 12 x 2,30	1,40	1,79	20	30	12	2,264	2,30	0,97	0,90	0,73	0,73	3,28	1,33	1,35	0,93	0,82	0,031	0,96	1,75
20 x 30 x 12 x 2,70	1,60	2,04	20	30	12	2,664	2,70	1,04	0,97	0,71	0,71	3,48	1,43	1,31	0,93	0,80	0,048	1,03	1,69
21 x 30 x 13 x 0,32	0,21	0,27	21	30	13	0,284	0,32	0,21	0,19	0,87	0,87	0,66	0,24	1,55	1,01	0,99	0,000	0,23	2,04
21 x 30 x 13 x 0,38	0,26	0,33	21	30	13	0,344	0,38	0,25	0,23	0,87	0,87	0,79	0,29	1,55	1,01	0,99	0,000	0,28	2,03
21 x 30 x 13 x 0,43	0,29	0,38	21	30	13	0,394	0,43	0,28	0,26	0,87	0,87	0,90	0,33	1,55	1,01	0,99	0,000	0,31	2,03
21 x 30 x 13 x 0,50	0,35	0,44	21	30	13	0,464	0,50	0,33	0,30	0,86	0,86	1,05	0,38	1,54	1,01	0,98	0,000	0,36	2,02
21 x 30 x 13 x 0,65	0,45	0,58	21	30	13	0,614	0,65	0,42	0,39	0,86	0,86	1,35	0,49	1,53	1,01	0,98	0,001	0,46	2,01
21 x 75 x 10 x 0,43	0,42	0,53	21	75	10	0,394	0,43	0,35	0,24	0,82	0,82	4,95	1,05	3,06	0,63	0,61	0,000	2,64	3,22
21 x 75 x 10 x 0,50	0,49	0,62	21	75	10	0,464	0,50	0,41	0,28	0,81	0,81	5,79	1,23	3,05	0,63	0,61	0,000	3,07	3,22
21 x 75 x 10 x 0,65	0,64	0,82	21	75	10	0,614	0,65	0,53	0,36	0,80	0,80	7,54	1,61	3,04	0,63	0,60	0,001	3,97	3,20
21 x 75 x 10 x 0,80	0,79	1,01	21	75	10	0,764	0,80	0,64	0,44	0,80	0,80	9,23	1,98	3,03	0,63	0,59	0,002	4,83	3,19
21 x 75 x 10 x 0,95	0,94	1,20	21	75	10	0,914	0,95	0,75	0,51	0,79	0,79	10,86	2,33	3,01	0,63	0,58	0,003	5,65	3,17

\* Espessura do revestimento metálico considerada no cálculo: tr = 0,036 mm.



# ***Anexo D***

---

Memorial de Cálculo  
Galpão de Pequeno Porte

## Sumário

1	Descrição e Parâmetros de Projeto .....	115
1.1	Objetivo .....	115
1.2	Normas empregadas .....	120
1.3	Materiais .....	121
2	Premissas de cálculo .....	121
2.1	Cálculo dos esforços .....	121
2.2	Coeficientes de ponderação e combinações .....	121
2.3	Ação do vento.....	123
2.4	Carregamentos adotados na cobertura .....	126
3	Esforços solicitantes nos elementos de aço .....	126
3.1	Elementos do pórtico .....	127
3.2	Terças de coberturas.....	128
3.3	Plano do telhado.....	129
3.4	Plano da testeira de fechamento .....	130
3.5	Plano do fechamento lateral do galpão .....	130
3.6	Plano das vigas de apoio (nível +8.900).....	131
3.7	Combinação dos esforços máximos.....	132
3.8	Verificação dos deslocamentos máximos.....	136
4	Dimensionamento dos elementos de aço .....	138
4.1	S1 / Banzo superior / U200x75x2,65 .....	139
4.2	S2 / Banzo inferior / U200x75x2,65 .....	144
4.3	S3 / Diagonal / 2L 40x2,25 .....	148
4.4	S4 / Montante / 2L 40x2,25.....	150
4.5	S5 / Mão francesa / U 200x75x2,65 .....	151
4.6	S6 / Pilar / [2Ue 250x100x25x4,75 .....	152
4.7	S7 / Montante da testeira / ][ 2U100x50x2.65.....	156
4.8	S8 / Terça de cobertura / U125x50x2.65 .....	163
4.9	S9 / Travamento horizontal da cobertura / L50x2,65 .....	170

4.10	S10 / Corrente rígida / L50x2.65 .....	171
4.11	S11 / Longarina da testeira / U100x50x2,65 .....	173
4.12	S12 / Diagonal da testeira / $\Phi$ 9.0mm .....	178
4.13	S13 / Longarina de fechamento / Ue 300x85x25x3,00 mm.....	186
4.14	S14 / Viga de cobertura / ][ 2U 300x100x3,35 mm.....	151

# 1 Descrição e Parâmetros de Projeto

## 1.1 Objetivo

Este memorial de cálculo tem o objetivo de apresentar as premissas para o dimensionamento das estruturas de aço de um galpão de pequeno porte, de forma a esclarecer e demonstrar na prática os conceitos abordados neste manual. Apresentam-se os principais pontos onde a execução da estrutura (lado prático) é confrontada com os conceitos de projeto e a aplicação das teorias que regem o dimensionamento dos perfis formados a frio. No entanto, este material deve ser utilizado em conjunto com a ABNT NBR 14762:2010 para o perfeito entendimento da aplicação da mesma no dimensionamento. Na elaboração deste memorial, algumas equações contidas na norma não foram aqui explicitadas, mas somente sendo indicados seus resultados, para não extrapolar o número de páginas que viabilizam sua publicação. Não se demonstrou a obtenção de resultados de ordem geométrica (características geométricas das seções dos perfis), para isso aconselha-se buscar bibliografia específica (tais como livros de resistência dos materiais, física, estática e geometria de figuras planas). A demonstração da obtenção das larguras efetivas das seções transversais dos perfis, que serviram para a obtenção das propriedades geométricas da chamada “seção efetiva” foi realizada, em sua maioria, no texto principal deste manual (capítulos 5 e 6). O exemplo aqui apresentado é de uma edificação real, construída na cidade de São Paulo, implantada sobre uma estrutura de concreto armado (edifício) no nível +5,9 m em relação ao solo, a edificação metálica tem a utilidade de refeitório.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os desenhos em planta e corte do projeto a ser dimensionado, respectivamente.

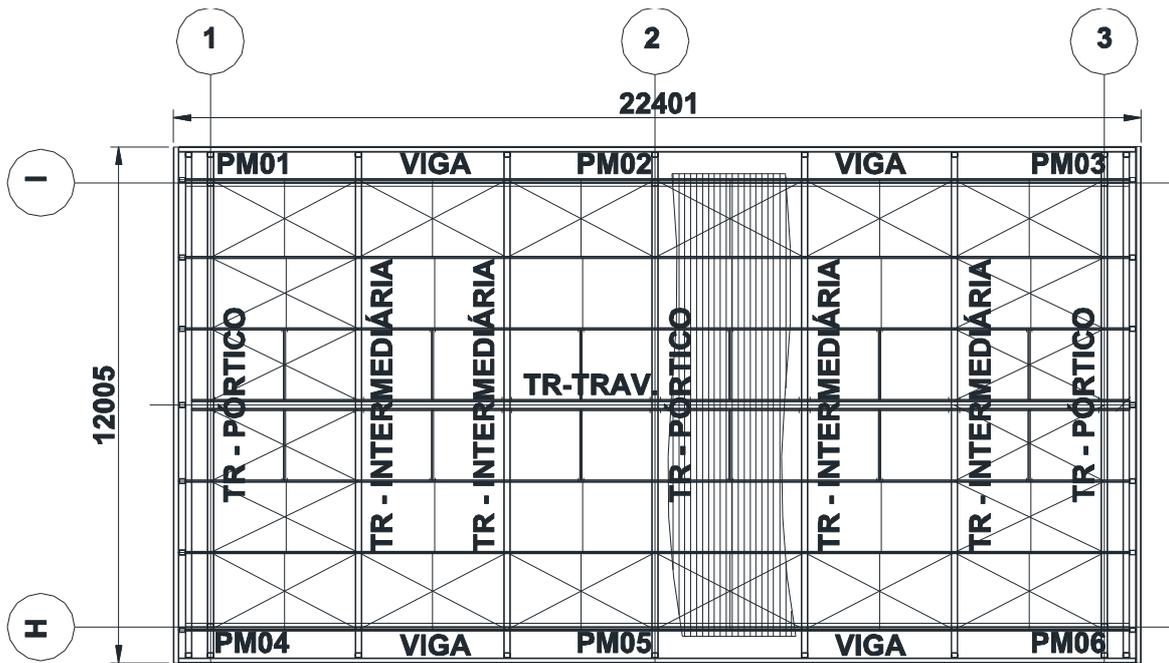


Figura 1 - Planta de cobertura.

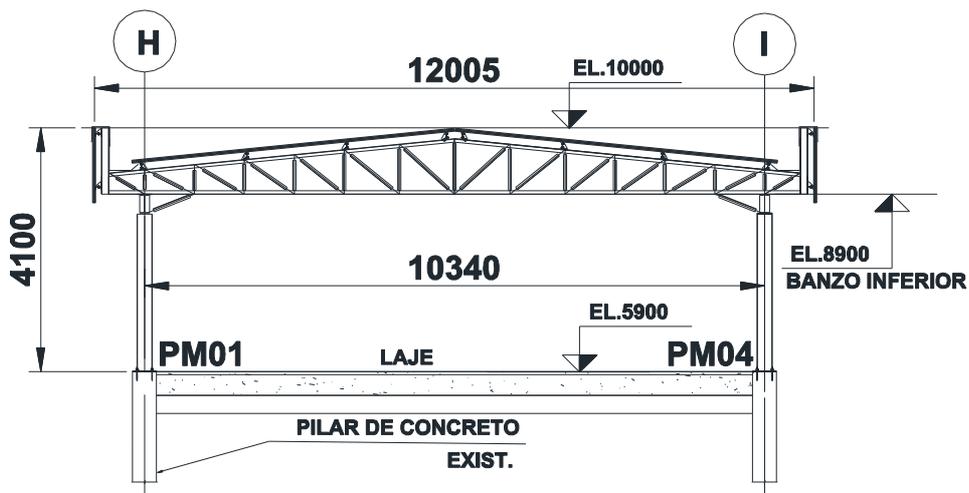


Figura 2 - Corte eixo 1.

## 1.2 Normas empregadas

A elaboração do projeto básico obedeceu às seguintes normas brasileiras:

- ABNT NBR 8800:2008 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios;
- ABNT NBR 14672:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.
- ABNT NBR 6123:1988 - Forças devido ao vento em edificações;

O detalhamento e a fabricação das estruturas deverá obedecer às mesmas Normas, de acordo com o tipo de serviço.

### **1.3 Materiais**

As seguintes especificações de materiais deverão ser seguidas:

- Chapa para os perfis formados a frio: CF24 (ABNT NBR 6649:1986)
- Resistência ao escoamento:  $f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$
- Peso específico:  $\gamma = 78,50 \text{ kN/m}^3$
- Módulo de elasticidade:  $E = 20.000 \text{ kN/cm}^2$
- Módulo de elasticidade transversal:  $G = 7.700 \text{ kN/cm}^2$
- Parafusos de alta resistência: ASTM A 325 galvanizados a quente
- Eletrodos para soldagem: E -70XX
- Chumbadores: Grapas com barras redondas ASTM A36 -  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$
- Chapa de ligações, nervuras e placas de base ASTM A 36 -  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$

## **2 Premissas de cálculo**

### **2.1 Cálculo dos esforços**

Para a obtenção dos valores dos esforços solicitantes nos elementos de aço e dos valores do deslocamento da estrutura foram utilizados programas de cálculo que fornecem os esforços solicitantes por meio de análise matricial da estrutura (Metálicas 3D 2012).

Os dimensionamentos das peças metálicas e o cálculo dos esforços resistentes foram feitos com o auxílio do programa de computador DIMPERFIL 4.0, versão atualizada para a ABNT NBR 14762:2010 e disponibilizado na versão demonstrativa pelo CBCA. (Nota: o Dimperfil 4.0 determina os esforços resistentes somente das seções constantes na ABNT NBR 6355:2012)

### **2.2 Coeficientes de ponderação e combinações**

Os coeficientes de ponderação de ações (majoração) e das resistências (minoração) recomendados pela ABNT NBR 14762:2010 e adotados neste exemplo, são apresentados a seguir:

- Minoração da resistência do aço relacionado a escoamento ( $\gamma_{a1}$ ) - 1,1 / 1,2
- Minoração da resistência do aço relacionado à ruptura ( $\gamma_{a2}$ ) - 1,35
- Majoração das ações ( $\gamma_f$ ) (ABNT NBR 14762:2010 – Tabela 01):
  - Para peso próprio de estrutura de aço – 1,25
  - Para sobrecarga na cobertura - 1,50
  - Para ação do vento - 1,40

As combinações de ações últimas normais, segundo o item 6.7.2.1 da ABNT NBR 14762:2010, são obtidas por meio da equação:

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

onde  $F_{Gi,k}$  representa os valores característicos das ações permanentes,  $F_{Q1,k}$  é o valor característico da ação variável principal,  $F_{Qj,k}$  é o valor característico das demais ações variáveis,  $\gamma_{gi}$  são os coeficientes de ponderação das ações permanentes,  $\gamma_{qj}$  são os coeficientes de ponderação das ações variáveis e os valores dos fatores de combinação  $\Psi_0$  para ações variáveis são dados por:

- Para sobrecarga em cobertura: 0,8
- Para ação do Vento: 0,6

Neste exemplo serão considerados quatro casos de vento conforme a ABNT NBR 6123:1988: Vento Frontal a 0°, Vento Lateral a 90°, Vento Frontal a 180° e Vento Lateral a 270°,

A seguir se apresenta a lista de combinações utilizada para verificação do estado-limite último das peças de aço:

Comb. 001	1.4 · Permanente				
Comb. 002	1.4 · Permanente +1.5 · Sobrecarga				
Comb. 003	1.4 · Permanente +1.4 · Vento 0				
Comb. 004	1.4 · Permanente +1.4 · Vento 90				
Comb. 005	1.4 · Permanente +1.4 · Vento 180				
Comb. 006	1.4 · Permanente +1.4 · Vento 270				
Comb. 007	1.4 · Permanente +1.5 · 0.8 · Sobrecarga +1.4 · Vento 0				
Comb. 008	1.4 · Permanente +1.5 · 0.8 · Sobrecarga +1.4 · Vento 90				
Comb. 009	1.4 · Permanente +1.5 · 0.8 · Sobrecarga +1.4 · Vento 180				
Comb. 010	1.4 · Permanente +1.5 · 0.8 · Sobrecarga +1.4 · Vento 270				
Comb. 011	1.4 · Permanente +1.5 · Sobrecarga +1.4 · 0.6 · Vento 0				
Comb. 012	1.4 · Permanente +1.5 · Sobrecarga +1.4 · 0.6 · Vento 90				
Comb. 013	1.4 · Permanente +1.5 · Sobrecarga +1.4 · 0.6 · Vento 180				
Comb. 014	1.4 · Permanente +1.5 · Sobrecarga +1.4 · 0.6 · Vento 270				

### 2.3 Ação do vento

Para o cálculo da ação do vento considera-se que a edificação se localiza em um terreno plano de um bairro da cidade de São Paulo. Assim, de acordo com a ABNT NBR 6123:1988 os parâmetros necessários para a determinação da ação do vento são apresentados a seguir:

- Velocidade básica do vento:  $V_0 = 40$  m/s (São Paulo)
- Fator topográfico:  $S_1 = 1,0$  (terreno plano)
- Rugosidade do terreno: Categoria IV (muitos obstáculos pouco espaçados)
- Maior dimensão da cobertura: maior que 20 m – Classe B
- Cota média da altura dos obstáculos:  $Z = 10,0$  m
- Fator  $S_2 = 0,83$  (Tabela 2 – ABNT NBR 6123:1988)
- Fator estatístico:  $S_3 = 1,0$  (Tabela 3 – ABNT NBR 6123:1988)
- Velocidade característica do vento:  $V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 33,2$  m/s
- Pressão dinâmica:  $q = 0,613 \cdot V_k^2 = 0,68$  kN/m<sup>2</sup>.

Para a obtenção do coeficiente de pressão interno ( $C_{pi}$ ) considera-se que o galpão possui duas faces opostas igualmente permeáveis e as outras faces impermeáveis. Segundo o item 6.2.5 da ABNT NBR 6123:1988, para ventos perpendiculares às faces permeáveis tem-se  $C_{pi} = +0,2$  e para ventos atuantes nas faces impermeáveis  $C_{pi} = -0,3$ .

A partir das dimensões do galpão obtém-se as seguintes relações geométricas:  $a/b = 1,8667$ ,  $h/b = 0,83333$ ,  $a/4 = 5,6$  m,  $b/3 = 4$  m e  $b/2 = 6$  m. Por meio da tabela 4 da ABNT NBR 6123:1988 obtém-se os coeficientes de forma externo nas paredes ( $C_e$ ) conforme mostra a Figura 3.

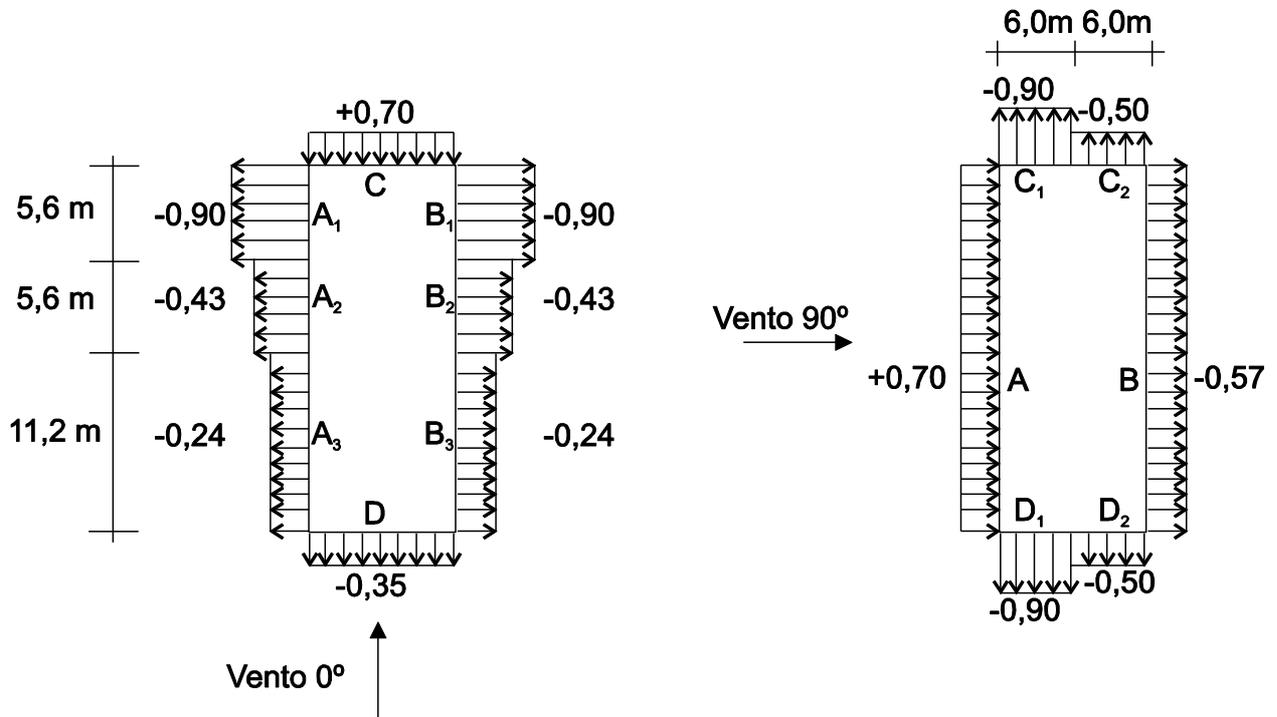


Figura 3 - Coeficientes de forma externo nas paredes ( $C_e$ ).

Considerando a inclinação do telhado igual a  $10,38^\circ$  e a cota do banzo inferior da tesoura igual a 8,9 m (ver Figura 2), os valores dos coeficientes de forma na cobertura são apresentados na Figura 4 (ver Tabela 5 da ABNT NBR 6123:1988).

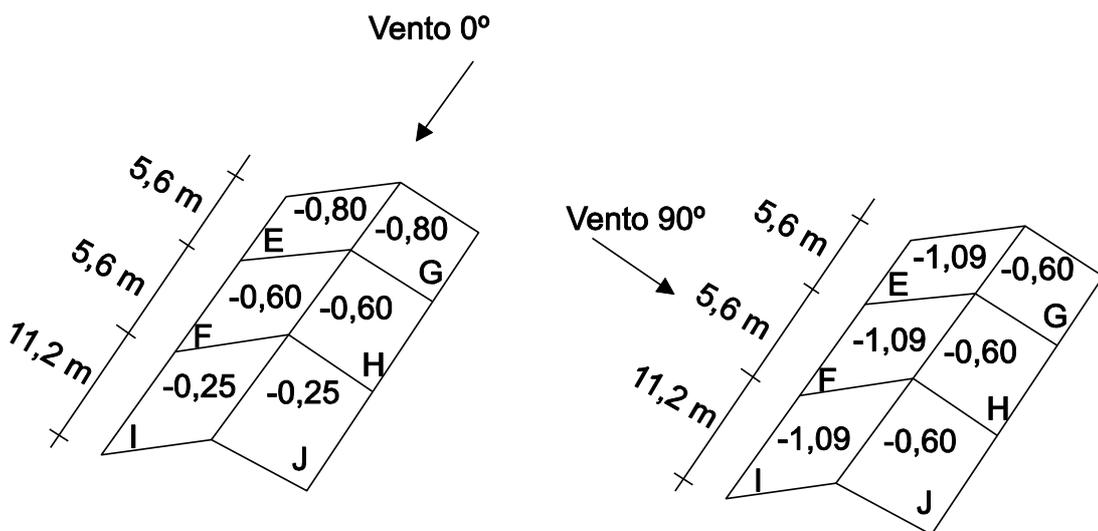


Figura 4 - Coeficientes de forma externo na cobertura ( $C_e$ ).

Com base nos coeficientes de forma interna e externa verifica-se quatro casos de combinação possíveis.

A Figura 5 mostra os coeficientes de forma internos e externos para o vento a  $0^\circ$ .

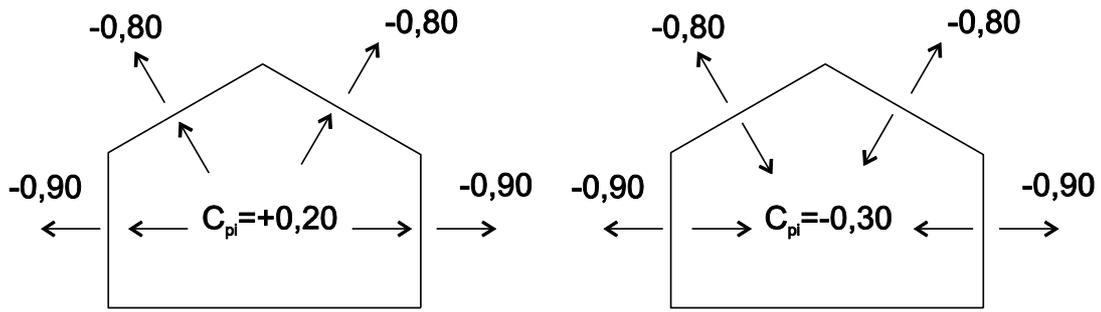


Figura 5 - Coeficientes de forma para vento a  $0^\circ$ .

A Figura 6 mostra os coeficientes de forma internos e externos para o vento a  $90^\circ$ .

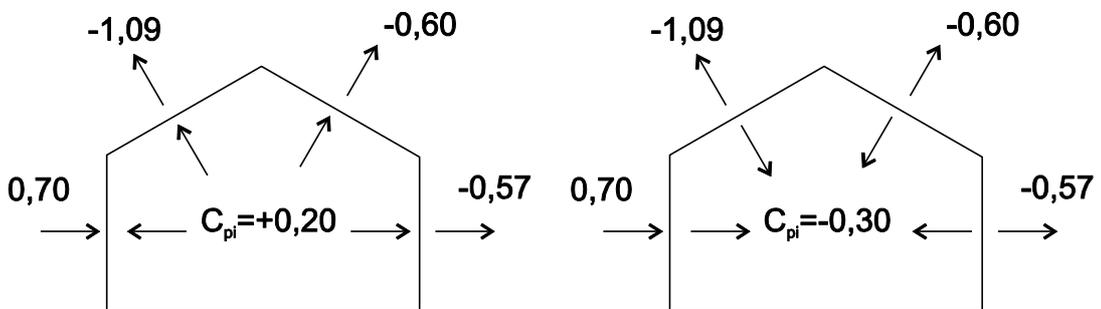


Figura 6 - Coeficientes de forma para vento a  $90^\circ$ .

Com base nos coeficientes de forma e na pressão dinâmica são obtidos os carregamentos máximos nas faces do galpão devido à ação do vento conforme mostra a Figura 7.

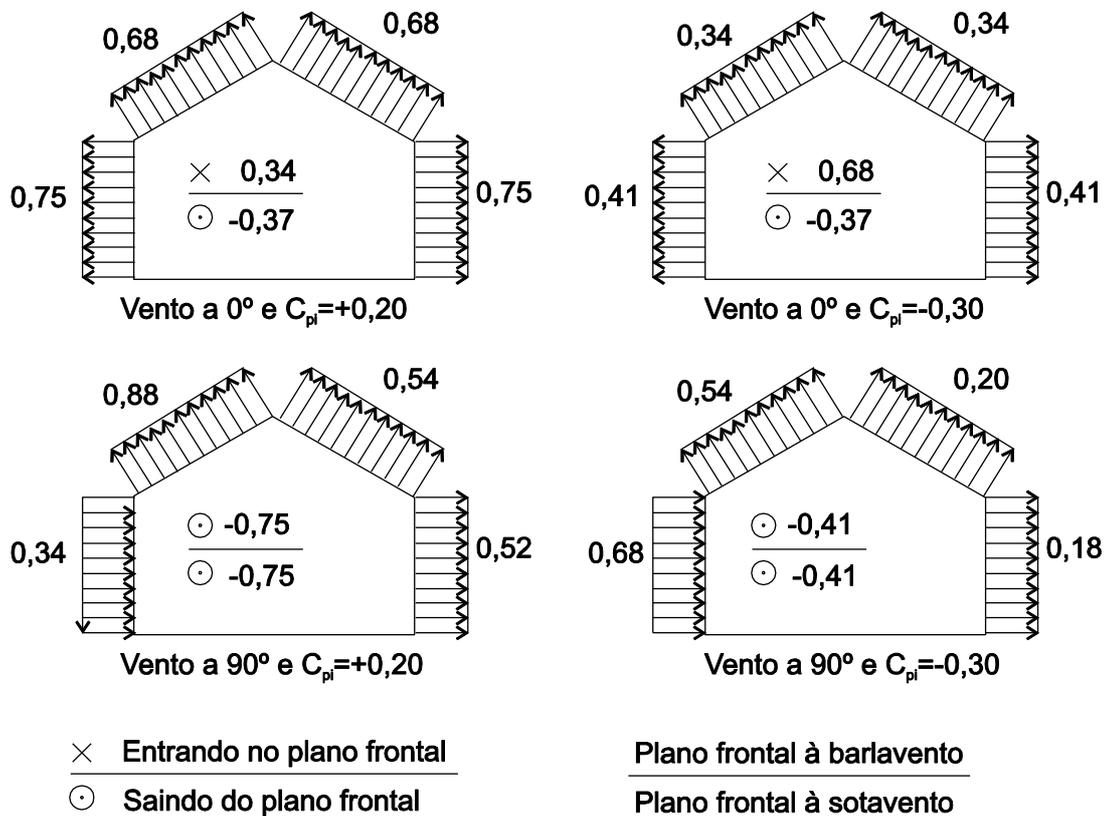


Figura 7 – Carregamentos máximos devido ao vento (kN/m<sup>2</sup>).

## 2.4 Carregamentos adotados na cobertura

Nesse exemplo são considerados os seguintes carregamentos atuantes na cobertura:

- Peso próprio da estrutura metálica (PPM) = ~ 0,25 kN/m<sup>2</sup>
- Peso próprio da telha metálica tipo sanduiche com lã de rocha = 0,2 kN/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga na cobertura = 0,4 kN/m<sup>2</sup> (sendo 0,25 kN/m<sup>2</sup> de forro e instalações e 0,15 kN/m<sup>2</sup> de carga variável)
- Carga permanente vertical no fechamento e testeira = 0,25 kN/m<sup>2</sup>

## 3 Esforços solicitantes nos elementos de aço

Serão verificadas as seguintes seções:

S1 – banzo superior: U200x75x2,65

S2 – banzo inferior: U200x75x2,65

S3 – diagonal: 2L 40x2,25

S4 – montante: 2L 40x2,25

S5 – mão francesa: U200x75x2,65

- S6 – pilar:  $2Ue\ 250 \times 100 \times 25 \times 4,75$
- S7 – montante da testeira:  $2U100 \times 50 \times 2,00$
- S8 – terço de cobertura:  $U125 \times 50 \times 2,65$
- S9 – travamento horizontal:  $L50 \times 2,65$
- S10 – corrente rígida:  $L50 \times 2,65$
- S11 – longarina da testeira de fechamento:  $U100 \times 50 \times 2,65$
- S12 – diagonal da testeira de fechamento:  $L50 \times 2,65$
- S13 – longarina do fechamento do galpão:  $Ue\ 300 \times 85 \times 25 \times 3,00$
- S14 – viga de apoio das treliças intermediárias:  $2U\ 300 \times 100 \times 3,30$

A Figura 8 mostra uma perspectiva da estrutura a ser analisada.

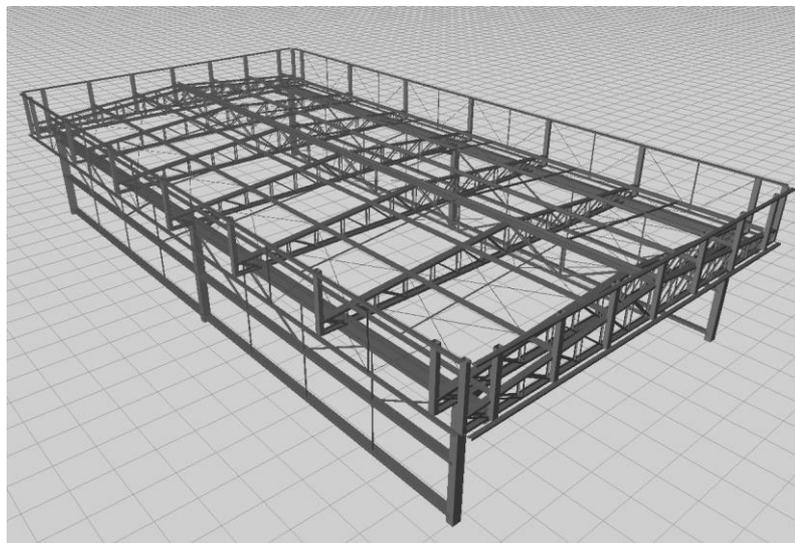


Figura 8 – Modelo estrutural.

Utilizando o programa computacional METÁLICA-3D e com base nos carregamentos adotados, apresenta-se, nos próximos itens, a envoltória de esforços solicitantes nos elementos estruturais.

Os esforços aqui apresentados já se encontram amplificados para a consideração dos efeitos da não linearidade geométrica.

### 3.1 Elementos do pórtico

A envoltória de forças normais no pórtico no plano do eixo 2 está apresentada na Figura 9.

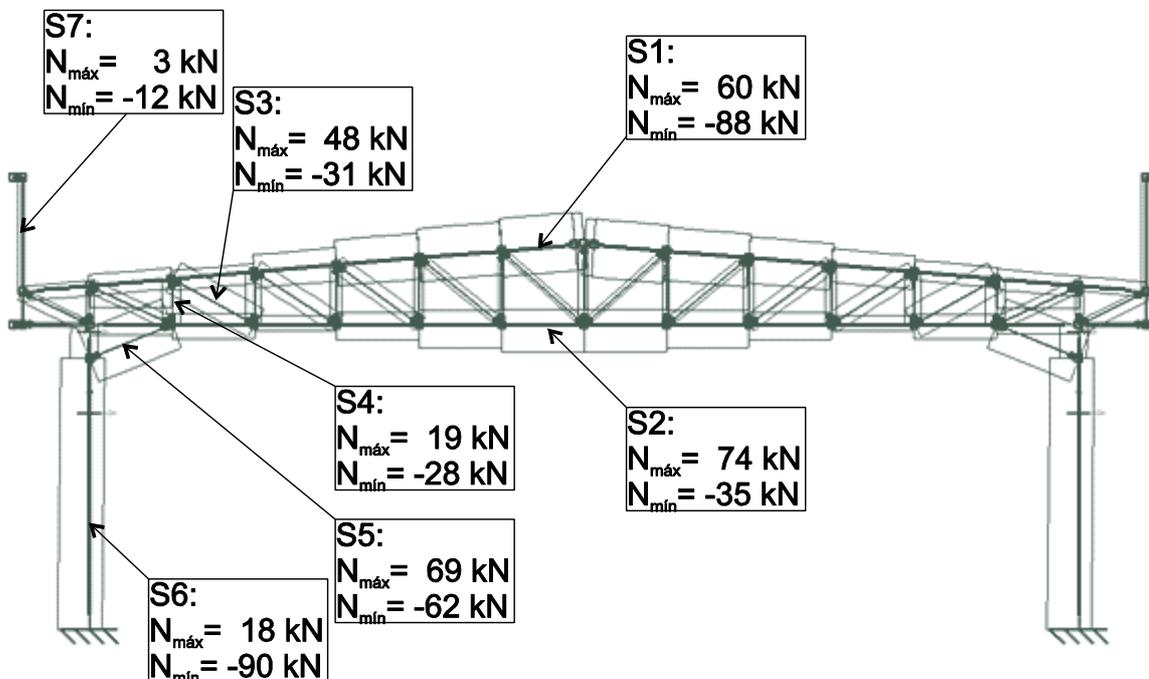


Figura 9 – Envoltória de forças normais no pórtico.

A envoltória de momentos fletores no pórtico do eixo 2 está apresentada na Figura 10.

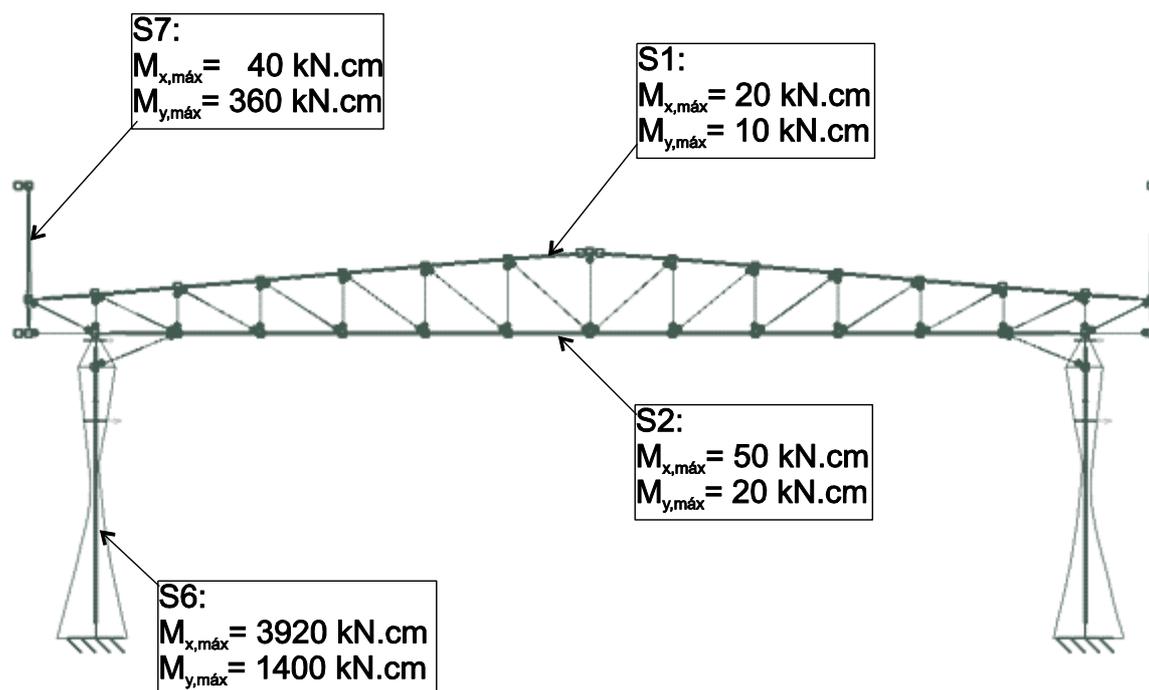


Figura 10 – Envoltória de momentos fletores no pórtico.

### 3.2 Terças de coberturas

A envoltória de forças normais nas terças da cobertura está apresentada na Figura 11.

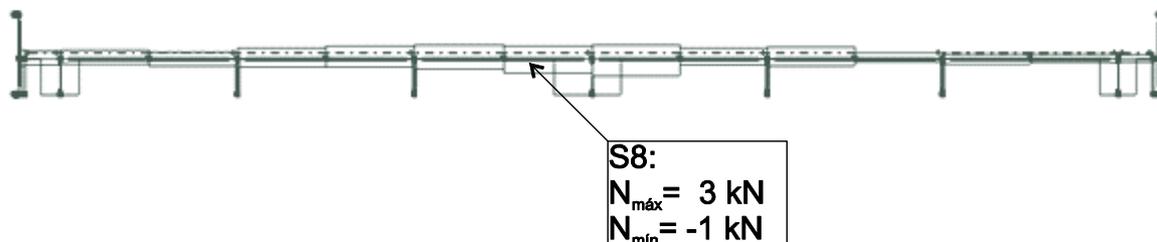


Figura 11 – Envoltória de forças normais nas terças.

A envoltória de momentos fletores nas terças da cobertura está apresentada na Figura 12.

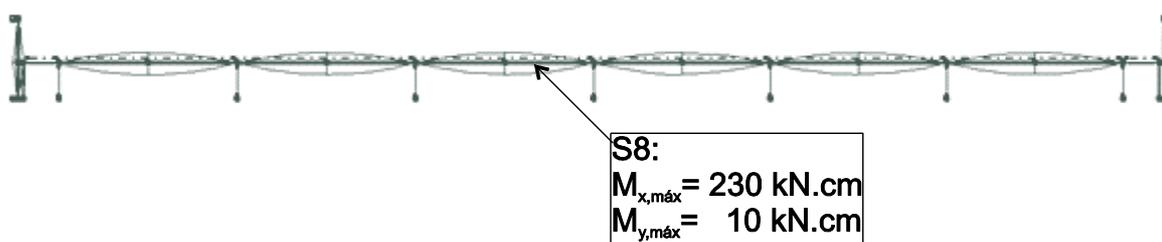


Figura 12 – Envoltória de momentos fletores nas terças.

### 3.3 Plano do telhado

A envoltória de forças normais no plano do telhado está apresentada na Figura 13.

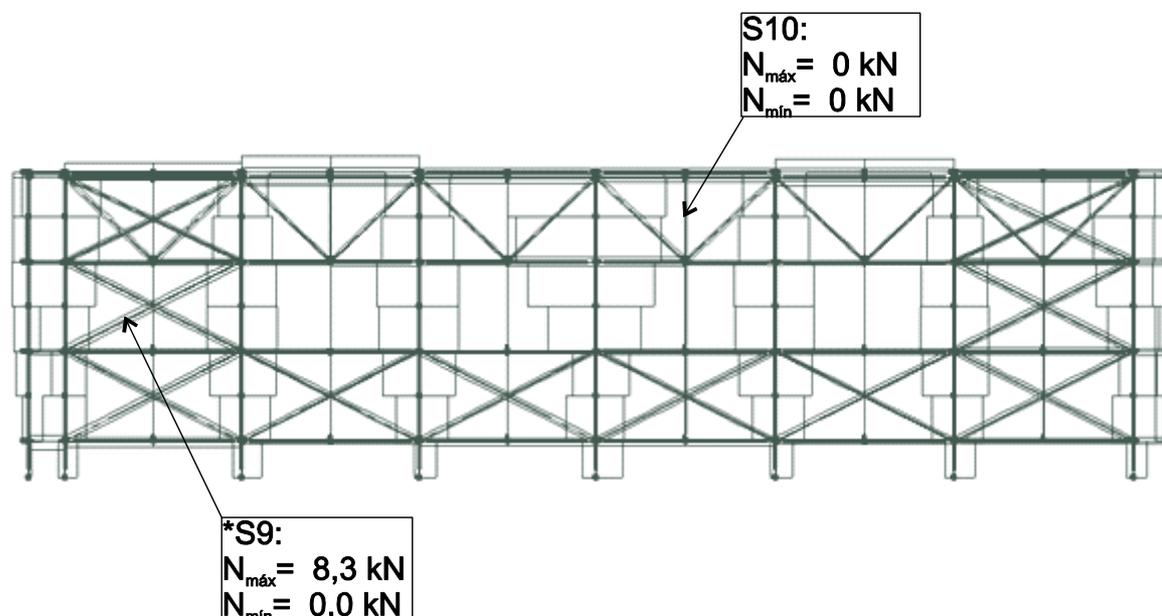


Figura 13 – Envoltória de forças normais no plano do telhado (é mostrado apenas uma água do telhado).

\* Um cuidado a se tomar em relação às forças normais nos contraventamentos em “X”, em que se admite que a peça trabalhe somente a tração (neste caso, S9). Deve-se verificar se programa de computador utilizado para o cálculo dos esforços possui o recurso de desconsiderar as barras que estão comprimidas e recalculá-las automaticamente. Caso contrário será necessário fazer isso manualmente para cada caso de carregamento.

### 3.4 Plano da testeira de fechamento

A envoltória de forças normais no plano do telhado está apresentada na Figura 14.

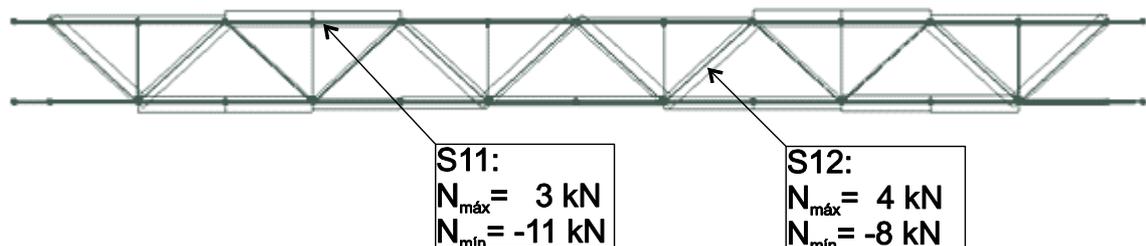


Figura 14 – Envoltória de forças normais no plano da testeira do fechamento.

### 3.5 Plano do fechamento lateral do galpão

A envoltória de forças normais no plano do fechamento lateral está apresentada na Figura 15.

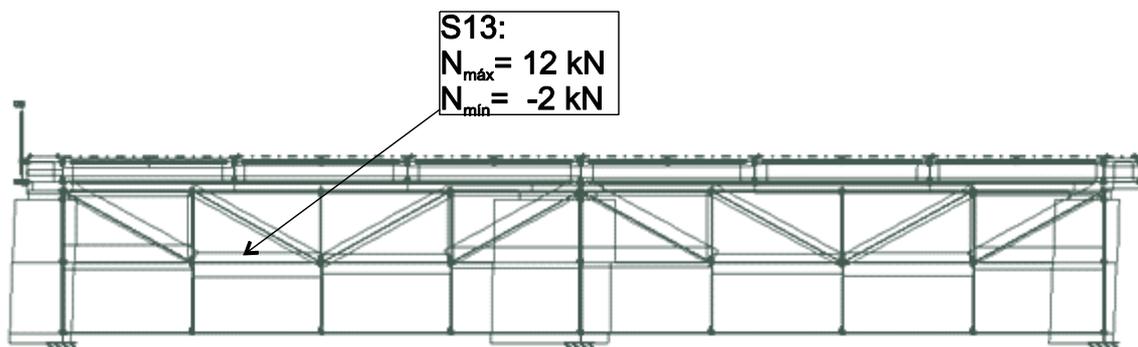


Figura 15 – Envoltória de forças normais no plano do fechamento lateral.

A envoltória de momentos fletores no plano do fechamento lateral está apresentada na Figura 16.

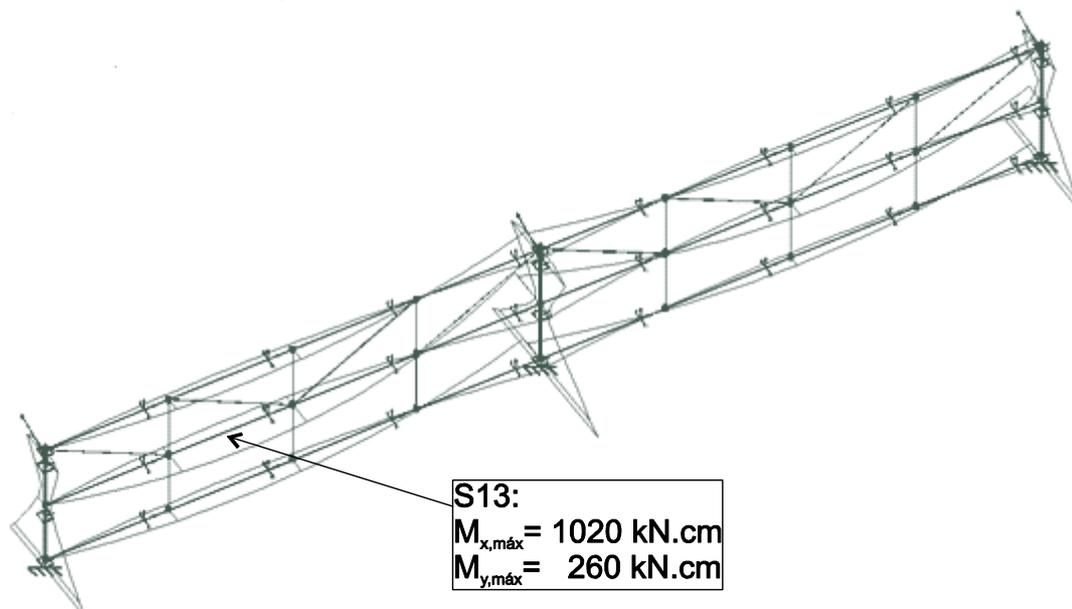


Figura 16 – Envoltória de momentos fletores no plano do fechamento lateral.

### 3.6 Plano das vigas de apoio (nível +8.900)

A envoltória de forças normais no plano das vigas de apoio está apresentada na Figura 17.

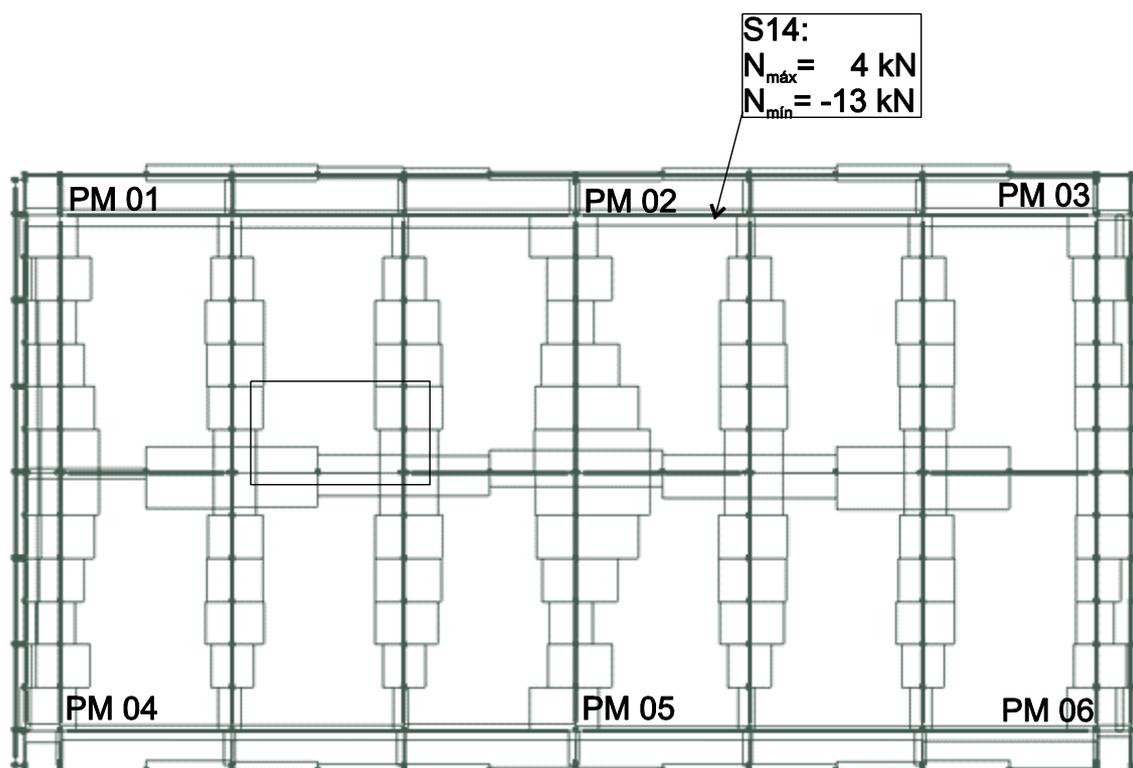


Figura 17 – Envoltória de forças normais no plano das vigas de apoio.

A envoltória de momentos fletores no plano das vigas de apoio está apresentada na Figura 18.

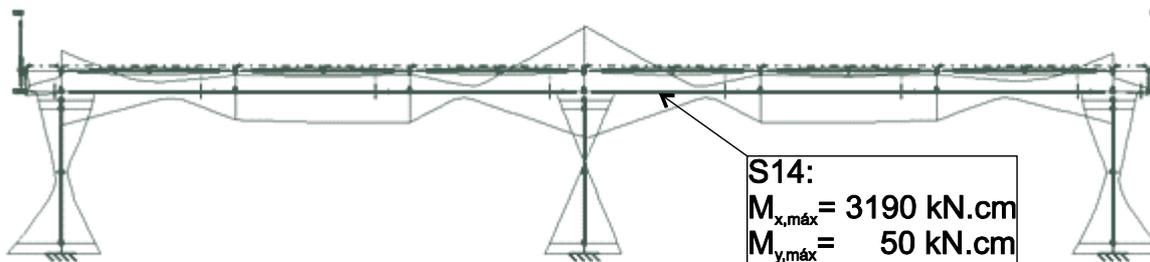


Figura 18 – Envoltória de momentos fletores no plano das vigas de apoio.

\* Devido à simetria em “X” de todas as seções submetidas ao momento fletor  $M_x$ , indicou-se os valores dos mesmos como positivos em todos os casos.

### 3.7 Combinação dos esforços máximos

A partir dos carregamentos adotados apresentam-se nas tabelas seguintes as combinações, em estado limite último, que fornecem os esforços máximos para cada elemento a ser dimensionado. São listados a força normal (N), as forças cortantes em relação aos eixos de maior e menor inércia da seção transversal ( $V_z$  e  $V_y$ , respectivamente), o momento torçor ( $M_t$ ) e os momentos fletores em torno dos eixos de maior e menor inércia da seção transversal ( $M_x$  e  $M_y$ , respectivamente).

Tabela 1 – Combinação de esforços para o elemento S1.

Combinação		N	$V_y$	$V_z$	$M_t$	$M_x$	$M_y$	BANZO SUPERIOR U200x75x2,65
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)	
Comb. 003	$N_{máx}$	6,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	
Comb. 005	$M_{x,máx}$	5,92	-0,03	0,02	0,00	0,02	0,00	
Comb. 010	$M_{y,máx}$	0,14	-0,03	0,01	0,00	0,00	-0,01	
<b>Comb. 002</b>	<b><math>N_{min}</math></b>	<b>-8,80</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	
Comb. 009	$V_{z,máx}$	1,82	-0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	
Comb. 006	$V_{y,máx}$	4,25	-0,05	0,00	0,00	0,01	-0,01	

Tabela 2 – Combinação de esforços para o elemento S2.

Combinação		N	$V_y$	$V_z$	$M_t$	$M_x$	$M_y$	BANZO INFERIOR U200x75x2,65
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)	
<b>Comb. 002</b>	<b><math>N_{máx}</math></b>	<b>7,39</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	
Comb. 003	$M_{x,máx}$	-2,90	-0,02	-0,02	0,00	-0,05	-0,02	
Comb. 002	$M_{y,máx}$	7,39	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	
Comb. 004	$N_{min}$	-3,48	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	
Comb. 003	$V_{z,máx}$	-2,90	-0,02	-0,02	0,00	-0,05	-0,02	
Comb. 003	$V_{y,máx}$	-2,90	-0,02	-0,02	0,00	-0,05	-0,02	

Tabela 3 – Combinação de esforços para o elemento S3.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 002	N <sub>máx</sub>	4,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>x,máx</sub>	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>y,máx</sub>	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Comb. 006</b>	<b>N<sub>min</sub></b>	<b>-3,15</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Comb. 001	V <sub>z,máx</sub>	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>y,máx</sub>	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

DIAGONAL

2L 40x2,25

Tabela 4 – Combinação de esforços para o elemento S4.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
1	0,000 m	(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 006	N <sub>máx</sub>	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>x,máx</sub>	-1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>y,máx</sub>	-1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Comb. 002</b>	<b>N<sub>min</sub></b>	<b>-2,79</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Comb. 001	V <sub>z,máx</sub>	-1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>y,máx</sub>	-1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

MONTANTE

2L 40x2,25

Tabela 5 – Combinação de esforços para o elemento S5.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 006	N <sub>máx</sub>	6,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>x,máx</sub>	-2,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>y,máx</sub>	-2,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Comb. 002</b>	<b>N<sub>min</sub></b>	<b>-6,16</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Comb. 001	V <sub>z,máx</sub>	-2,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>y,máx</sub>	-2,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

MÃO FRANCESA

U200x75x2,65

Tabela 6 – Combinação de esforços para o elemento S6.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 003	N <sub>máx</sub>	1,78	1,31	1,64	0,00	0,50	1,40
<b>Comb. 006</b>	<b>M<sub>x,máx</sub></b>	<b>1,68</b>	<b>0,02</b>	<b>-2,87</b>	<b>0,00</b>	<b>-3,92</b>	<b>0,00</b>
Comb. 003	M <sub>y,máx</sub>	1,78	1,31	1,64	0,00	0,50	1,40
Comb. 002	N <sub>min</sub>	-8,97	-0,07	1,02	0,00	1,19	-0,08
Comb. 006	V <sub>z,máx</sub>	1,68	0,02	-2,87	0,00	-3,92	0,00
Comb. 003	V <sub>y,máx</sub>	1,78	1,31	1,64	0,00	0,50	1,40

PILAR

[] 2Ue 250x100x4,75

Tabela 7 – Combinação de esforços para o elemento S7.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 006	N <sub>máx</sub>	0,26	-0,01	-0,12	0,00	-0,17	-0,01
<b>Comb. 007</b>	<b>M<sub>x,máx</sub></b>	<b>-0,21</b>	<b>0,01</b>	<b>0,28</b>	<b>0,00</b>	<b>0,36</b>	<b>0,01</b>
Comb. 005	M <sub>y,máx</sub>	0,24	-0,04	0,28	0,00	0,32	-0,04
Comb. 002	N <sub>min</sub>	-1,23	0,03	-0,01	0,00	0,11	0,03
Comb. 005	V <sub>z,máx</sub>	0,24	-0,04	0,28	0,00	0,32	-0,04
Comb. 003	V <sub>y,máx</sub>	0,25	0,00	0,28	0,00	0,32	0,00

MONTANTE  
TESTEIRA  
[[ 2U100x50x2,65

Tabela 8 – Combinação de esforços para o elemento S8.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 006	N <sub>máx</sub>	0,29	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
<b>Comb. 002</b>	<b>M<sub>x,máx</sub></b>	<b>-0,12</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,23</b>	<b>0,01</b>
Comb. 012	M <sub>y,máx</sub>	-0,06	0,01	0,01	0,00	-0,12	0,01
Comb. 002	N <sub>min</sub>	-0,12	0,01	0,01	0,00	-0,23	0,01
Comb. 002	V <sub>z,máx</sub>	-0,12	0,01	0,01	0,00	-0,23	0,01
Comb. 014	V <sub>y,máx</sub>	0,08	0,01	0,00	0,00	-0,07	0,01

TERÇA DE  
COBERTURA  
U125x50x2,65

Tabela 9 – Combinação de esforços para o elemento S9.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
<b>Comb. 006</b>	<b>N<sub>máx</sub></b>	<b>0,83</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Comb. 001	M <sub>x,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>y,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 002	N <sub>min</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>z,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>y,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

TRAV, HORIZONTAL  
L50x2,65

Tabela 10 – Combinação de esforços para o elemento S10.

Combinação		N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
		(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 005	N <sub>máx</sub>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>x,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>y,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Comb. 002</b>	<b>N<sub>min</sub></b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Comb. 001	V <sub>z,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>y,máx</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

CORRENTE RÍGIDA  
L50x2,65

Tabela 11 – Combinação de esforços para o elemento S11.

Seção	S11	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
1	0,000 m	(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 005	N <sub>máx</sub>	0,25	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01
Comb. 009	M <sub>x,máx</sub>	-0,13	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01
Comb. 003	M <sub>y,máx</sub>	0,20	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01
Comb. 002	N <sub>mín</sub>	-1,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 003	V <sub>z,máx</sub>	0,20	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01
Comb. 003	V <sub>y,máx</sub>	0,20	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01

LONGARINA DA  
TESTEIRA  
U100x50x2,65

Tabela 12 – Combinação de esforços para o elemento S12.

Seção	S12	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
1	0,000 m	(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 002	N <sub>máx</sub>	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>x,máx</sub>	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	M <sub>y,máx</sub>	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 015	N <sub>mín</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>z,máx</sub>	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 001	V <sub>y,máx</sub>	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

DIAGONAL DA  
TESTEIRA  
Φ0,95

Tabela 13 – Combinação de esforços para o elemento S13.

Seção	S13	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
1	0,000 m	(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 012	N <sub>máx</sub>	1,24	-0,09	0,07	0,00	0,41	-0,12
Comb. 007	M <sub>x,máx</sub>	0,16	-0,14	0,18	0,00	1,02	-0,26
Comb. 007	M <sub>y,máx</sub>	0,16	-0,14	0,18	0,00	1,02	-0,26
Comb. 003	N <sub>mín</sub>	-0,18	-0,14	0,18	0,00	1,02	-0,26
Comb. 005	V <sub>z,máx</sub>	0,71	-0,14	0,18	0,00	1,01	-0,25
Comb. 003	V <sub>y,máx</sub>	-0,18	-0,14	0,18	0,00	1,02	-0,26

LONGARIA DE  
FECHAMENTO  
Ue 300x85x25x3

Tabela 14 – Combinação de esforços para o elemento S14.

Seção	S14	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
9	3,430 m	(t)	(t)	(t)	(t·m)	(t·m)	(t·m)
Comb. 006	N <sub>máx</sub>	0,36	0,00	-0,49	0,00	1,22	0,02
Comb. 002	M <sub>x,máx</sub>	-0,90	0,01	1,44	0,00	-3,19	-0,01
Comb. 007	M <sub>y,máx</sub>	-1,34	0,01	0,10	0,00	-0,15	-0,05
Comb. 007	N <sub>mín</sub>	-1,34	0,01	0,10	0,00	-0,15	-0,05
Comb. 002	V <sub>z,máx</sub>	-0,90	0,01	1,44	0,00	-3,19	-0,01
Comb. 007	V <sub>y,máx</sub>	-1,34	0,01	0,10	0,00	-0,15	-0,05

VIGA  
II 2U 300x100x3,3

### 3.8 Verificação dos deslocamentos máximos

Ao projetar uma estrutura deve-se verificar o estado-limite de serviço de deslocamentos máximos. Os limites de deslocamentos estão indicados no Anexo C da ABNT NBR 8800:2008.

Neste exemplo são verificados os seguintes deslocamentos máximos:

- Deslocamento máximo do topo dos pilares em edificação de 1 pavimento =  $L/300$
- Deslocamento máximo de vigas principais de cobertura =  $L/250$
- Flecha máxima em terças de cobertura devido às forças gravitacionais =  $L/180$
- Flecha máxima nas travessas de fechamento =  $L/120$

Para verificação dos deslocamentos máximos, pode-se utilizar a combinação frequente de serviço, para a verificação relacionada ao conforto dos usuários, conforme ABNT NBR 14762:2010 item 6.7.3.3.

$$F_{\text{ser}} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \psi_1 F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Q_{j,k}})$$

$$\bar{\delta}_{\text{ser}} = \bar{\delta}_{\text{perm}} + 0,6 \bar{\delta}_{\text{sobrecarga}}$$

(conforme a Tabela 2 da ABNT NBR 14762:2010,  $\psi_1 = 0,6$  para ações variáveis onde pode haver equipamentos fixos por longos períodos – neste caso o forro e instalações elétricas)

Exceto para os deslocamentos nas terças de cobertura devido a ação de sucção do vento, em que a verificação dos deslocamentos deve ser realizada com seu valor característico, conforme indica a Tabela C.1 da ABNT NBR 8800:2008) e limitá-lo em  $L/120$ . E para ações no mesmo sentido da ação permanente, utilizar a combinação rara de serviço, e limite em  $L/180$ :

$$F_{\text{ser}} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} F_{Q_{j,k}})$$

$$\bar{\delta}_{\text{ser}} = \bar{\delta}_{\text{perm}} + \bar{\delta}_{\text{sobrecarga}} < L/180 \quad (\text{para as terças de cobertura})$$

e

$$\bar{\delta}_{\text{ser}} = \bar{\delta}_{\text{vento}} < L/120 \quad (\text{para as terças de cobertura e travessas de fechamento})$$

Na Figura 19 verifica-se que o deslocamento máximo vertical da treliça, igual a  $\bar{\delta}_{\text{máx}} = 11 \text{ mm}$ , é inferior ao recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 ( $L/250 = 10340/250 = 41 \text{ mm}$ ). Observa-se, também, que o deslocamento no topo dos pilares

( $\delta_{\text{topo}} = 6 \text{ mm}$ ) é inferior ao recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 ( $L/300 = 3000/300 = 10 \text{ mm}$ ).

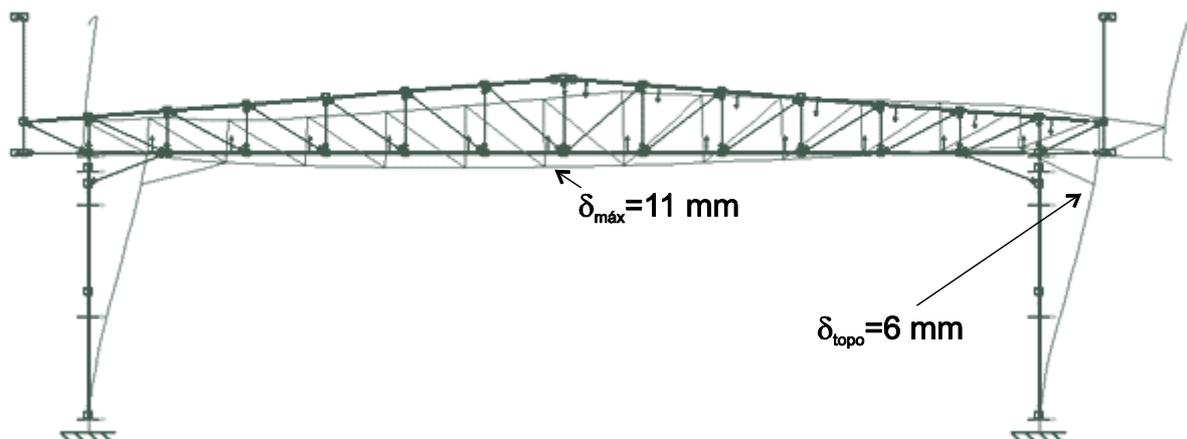


Figura 19 – Deslocamentos no pórtico principal.

Nas terças de cobertura, a ABNT NBR 8800:2008 recomenda que a flecha máxima devida às forças gravitacionais (carregamento permanente e sobrecarga) seja igual a  $L/180$  ( $3420/180 = 19 \text{ mm}$ ). Conforme mostra a Figura 20, o deslocamento máximo obtido é 7,5 mm.

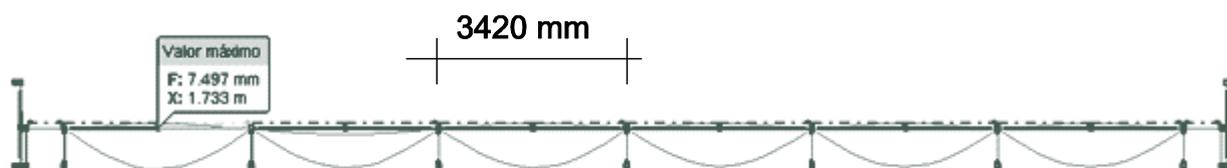


Figura 20 – Deslocamentos na terça de cobertura devido às forças gravitacionais.

Segundo a nota f da Tabela C.1. da ABNT NBR 8800:2008, o deslocamento máximo na terça de cobertura devido ao vento de sucção (vento a  $0^\circ$ ) com valor característico deve ser inferior a  $L/120$  ( $3420/120=28 \text{ mm}$ ). Conforme mostra a Figura 21 esta verificação é atendida.



Figura 21 – Deslocamentos na terça de cobertura devido à sucção do vento.

Na Figura 22 verifica-se que o deslocamento máximo devido ao valor característico da força de vento é inferior ao valor recomendado pela ABNT NBR 8800:2008 ( $L/120 = 86 \text{ mm}$ ).

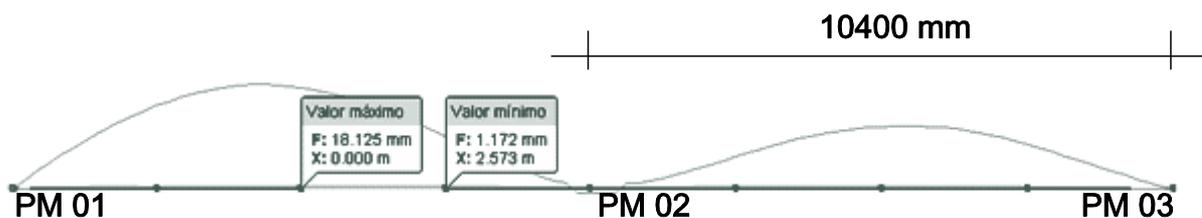


Figura 22 – Deslocamentos nas travessas de fechamento.

#### 4 Dimensionamento dos elementos de aço

A seguir é apresentado o dimensionamento das peças de aço utilizando-se perfis formados a frio como solução estrutural. Para o cálculo dos esforços resistentes foi utilizado o programa DIMPERFIL 4.0 tornado disponível pelo CBCA.

Para efeito de dimensionamento, todas as combinações apresentadas no item 3.7 devem ser verificadas para a seção escolhida. Neste memorial de cálculo, no entanto, mostra-se somente a verificação para a combinação crítica, ou seja, aquela que resulta o maior valor como resultado da equação de verificação de barras submetidas à flexão composta, conforme o capítulo 7 (eq. 7.1) deste manual.

Os elementos a serem dimensionados estão apresentados na Figura 23.

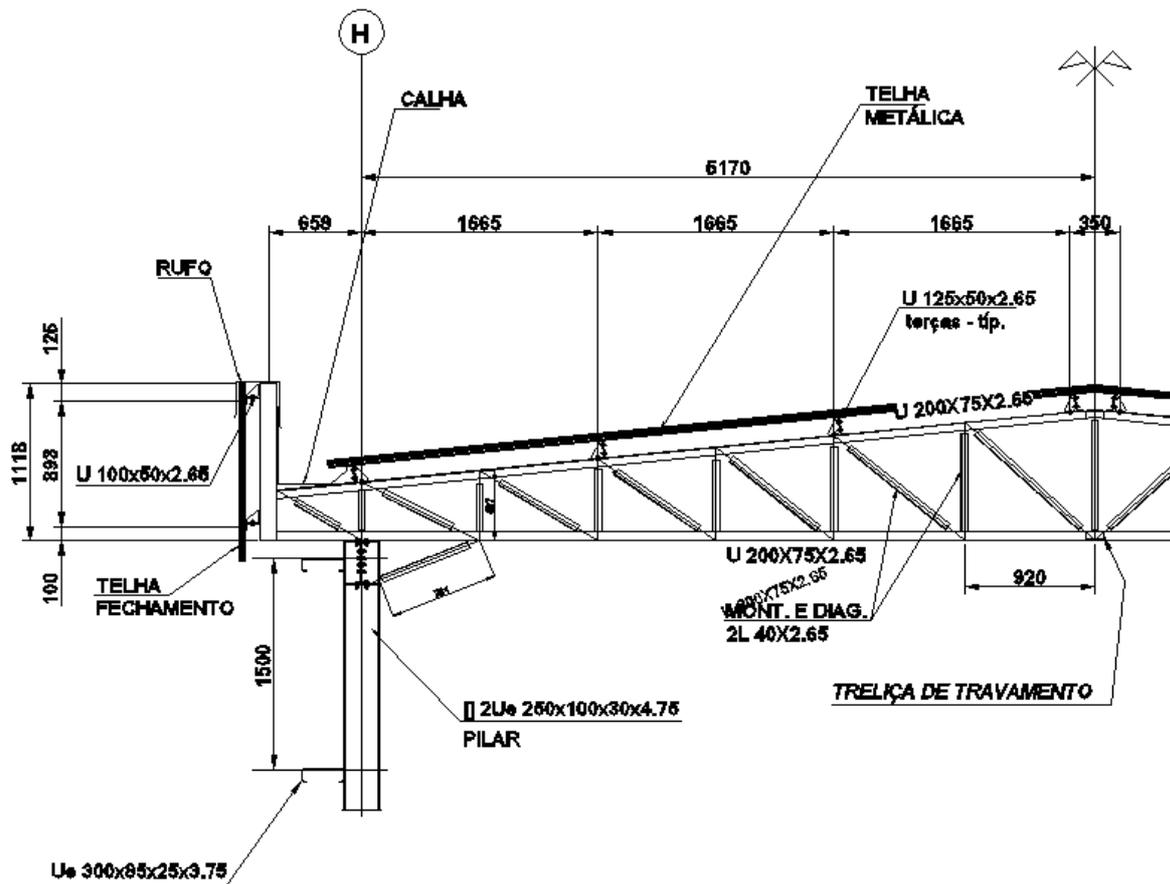
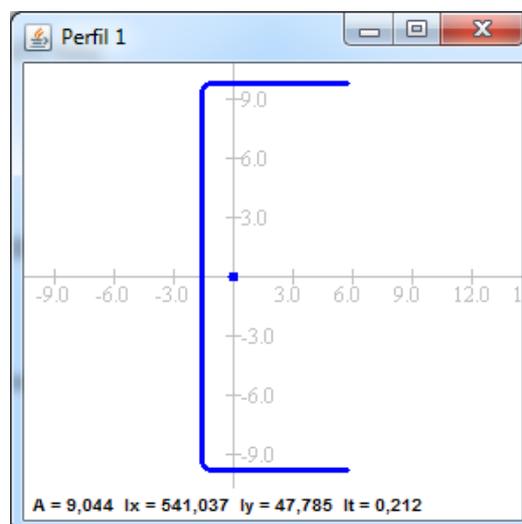


Figura 23 – Detalhe da tesoura.

#### 4.1 S1 / Banzo superior / U200x75x2,65

Características geométricas do perfil U 200x75x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 9,04 \text{ cm}^2$	
$I_x = 541,04 \text{ cm}^4$	$I_y = 47,79 \text{ cm}^4$
$W_x = 54,10 \text{ cm}^3$	$W_y = 8,27 \text{ cm}^3$
$r_x = 7,73 \text{ cm}$	$r_y = 2,30 \text{ cm}$
$I_t = 0,21 \text{ cm}^4$	
$I_w = 3235,32 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 9,084 \text{ cm}$	$x_0 = 4,172 \text{ cm}$
$r_i = 3,975 \text{ mm}$	$x_G = 1,724 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S1	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 002	N <sub>mín</sub>	-8,80	0,05	0,02	0,00	-0,02	0,00

Comprimento do perfil: L<sub>x</sub> = 520 cm (travamento com treliça no meio do vão);

$$L_y = 92 \text{ cm}$$

$$L_z = 92 \text{ cm}$$

Elemento submetido à flexocompressão.

(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo N<sub>e</sub> [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

Conforme ABNT NBR 8800:2008 E.2.1.2, em elementos contraventados, deve-se utilizar coeficiente de flambagem por flexão igual a 1, neste caso k<sub>x</sub> = k<sub>y</sub> = k<sub>z</sub> = 1,0.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 394,96 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 1114,421 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 934,157 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$= 350,54 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil monossimétrico em relação ao eixo X o valor de N<sub>e</sub> é o menor valor entre N<sub>ey</sub> e N<sub>exz</sub>, logo N<sub>e</sub> = 350,54 kN e o modo de instabilidade global é por flexotorção.

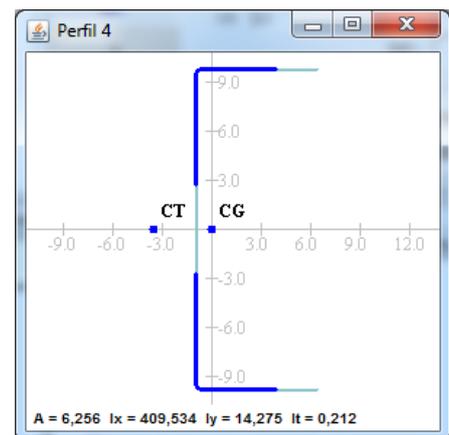
$$N_{ext} = 350,54 \text{ kN} \rightarrow N_e = 350,54 \text{ kN}$$

Assim, tem-se que o índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 0,787$$

Como λ<sub>0</sub> < 1,5, o fator de redução é dado por: χ = 0,658<sup>λ<sub>0</sub><sup>2</sup></sup> = 0,772. Logo a tensão de trabalho é igual a σ = χ · f<sub>y</sub> = 18,52 kN/cm<sup>2</sup>.

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a 6,256 cm<sup>2</sup>.



Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 96,55 \text{ kN} \quad \gamma = 1,2$$

NOTA: Na atualização da ABNT NBR 14762:2010 o coeficiente de ponderação  $\gamma$  utilizado no cálculo da força normal resistente de compressão passou de 1,1 para 1,2. O gráfico de dimensionamento para obtenção do fator de redução  $\chi$ , deixou de apresentar três curvas distintas que eram definidas em função do tipo de perfil e modo de instabilidade crítico e unificou as mesmas em uma única curva sem essa distinção.

(i.2) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(ii) Barras submetidas à flexão simples [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

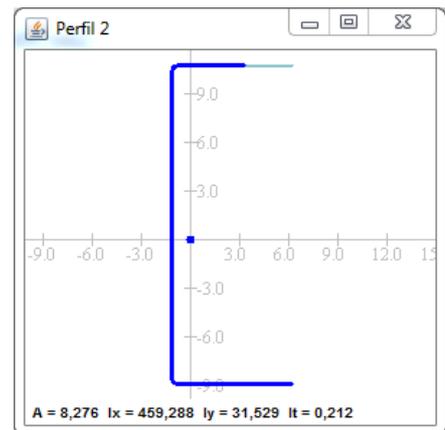
$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada Y= 10,916 cm (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 459,3 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 42,1 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 917,99 \text{ kN.cm}$



(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas é dado por:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

O fator de modificação para momento fletor não uniforme ( $C_b$ ) foi adotado igual a 1,0. Logo, tem-se  $M_e = 9268,54 \text{ kN.cm}$ .

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,374$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,0$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$ :

Máxima coordenada  $Y = 10,916 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 459,3 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 42,1 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 917,99 \text{ kN.cm}$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 917,99 \text{ kN.cm}$ .

### (ii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

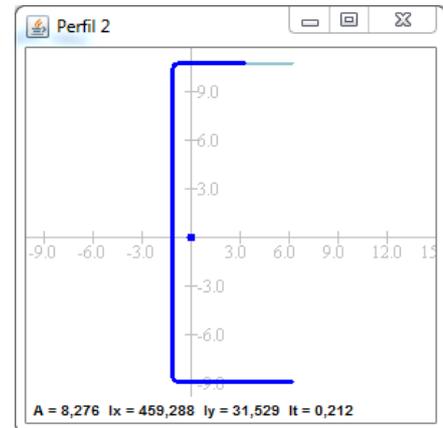
### (iii) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S1 iguais a:

$$\rightarrow N_{Rd} = 96,55 \text{ kN} \quad \rightarrow N_{Sd} = 88 \text{ kN}$$

$$\rightarrow M_{x,Rd} = 917,99 \text{ kN.cm} \quad \rightarrow M_{x,Sd} = 20 \text{ kN.cm}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:



$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,91 + 0,02 + 0 = 0,93 \leq 1 - \text{Ok!} -$$

Nota: Na última versão da NBR 14762:2010, a verificação à flexão composta eliminou as chamadas “verificação de resistência” e “verificação de estabilidade” por uma única verificação à flexão composta mostrada anteriormente. A verificação da não linearidade geométrica da barra isolada, antes implícita na “verificação de estabilidade”, agora é considerada por meio da utilização dos coeficiente  $B_1$  e  $B_2$  no método para a amplificação dos esforços solicitantes (ABNT NBR 8800:2008 Anexo D), que deve ser realizado também para os perfis formados a frio conforme indicado no item 8.1 da ABNT NBR14762:2010.

(iv) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos comprimidos o índice de esbeltez limite deve ser igual a 200.

Para o perfil S1 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{520}{7,3} = 71,2 \quad \text{ok}$$

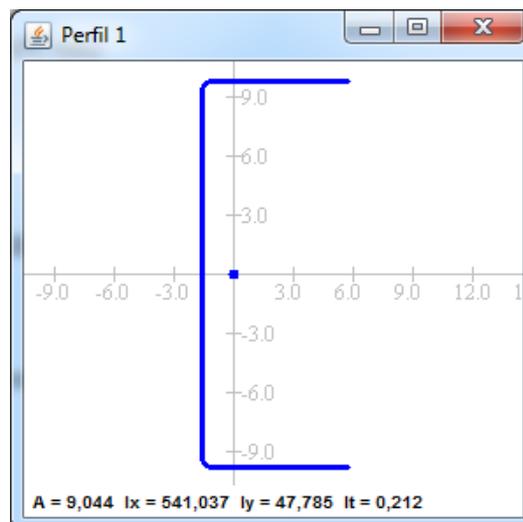
$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{92}{1,4} = 65,7 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

## 4.2 S2 / Banzo inferior / U200x75x2,65

Características geométricas do perfil U 200x75x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 9,04 \text{ cm}^2$	
$I_x = 541,04 \text{ cm}^4$	$I_y = 47,79 \text{ cm}^4$
$W_x = 54,10 \text{ cm}^3$	$W_y = 8,27 \text{ cm}^3$
$r_x = 7,73 \text{ cm}$	$r_y = 2,30 \text{ cm}$
$I_t = 0,21 \text{ cm}^4$	
$I_w = 3235,32 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 9,084 \text{ cm}$	$x_0 = 4,172 \text{ cm}$
$r_i = 3,975 \text{ mm}$	$x_G = 1,724 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S2	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 002	N <sub>mín</sub>	7,39	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02

Comprimento do perfil:  $L_x = 520 \text{ cm}$  (travamento com treliça no meio do vão);

$$L_y = 92 \text{ cm}$$

$$L_z = 92 \text{ cm}$$

Elemento submetido à flexotração

A combinação de maior compressão não foi verificada neste perfil, pois corresponde às mesmas condições de contorno, comprimentos efetivos de flambagem e designação de perfil que a S1, porém, com menor esforço.

(i) Barra submetida à tração [ABNT NBR 14762 – item 9.6]

(i.1) Cálculo para o escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma} = \frac{9,04 \cdot 24}{1,1} = 197,236 \text{ kN}$$

(i.2) Cálculo para na seção líquida fora da região da ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_n f_u}{\gamma} = \frac{9,04 \cdot 40}{1,35} = 267,851 \text{ kN}$$

(i.3) Cálculo para na seção líquida na região da ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\gamma} = \frac{1,0 \cdot 9,04 \cdot 40}{1,65} = 219,152 \text{ kN}$$

$C_t = 1,0$  (coeficiente de redução de área líquida devido a excentricidade da ligação – como neste caso trata-se de uma peça contínua a “ligação” é em todos os elementos do perfil).

A força axial resistente de cálculo é a menor entre as calculadas em (i.1), (i.2) e (i.3). Portanto,  $N_{t,Rd} = 197,236 \text{ kN}$

(ii) Barras submetidas à flexão simples [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inércia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $Y = 4,203 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 17,168 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 4,085 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 89,13 \text{ kN.cm}$

(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado por [ABNT NBR 14762 – Anexo E]:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

Como o momento fletor causa compressão na parte da seção com coordenada X positiva, tem-se  $C_s = -1,0$ . Sendo o elemento submetido à flexão com curvatura reversa  $C_m = +1,0$ .  $j$  é um parâmetro da seção transversal e vale  $11,162 \text{ cm}$ . Logo,

$$M_e = \frac{-1,0 \cdot 394,96}{1,0} \left[ 11,517 - 1,0 \sqrt{11,162^2 + 9,084^2} \left( \frac{934,157}{394,96} \right) \right]$$

$$M_e = 2654 \text{ kN.cm}$$

A fibra mais comprimida está a uma distância  $X=7,5-1,724= 5,776$  cm do centro geométrico do perfil. Assim, o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra mais comprimida é dado por:

$$W_c = \frac{I_y}{X} = \frac{47,79}{5,776} = 8,273 \text{ cm}^3$$

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,274$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,0$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24$  kN/cm<sup>2</sup>:

Máxima coordenada  $Y= 4,203$  cm (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 17,168 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 4,085 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

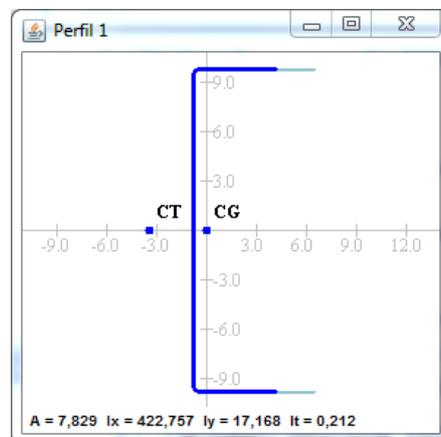
$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 89,13$  kN.cm

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 89,13$  kN.cm.

### (ii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.



(iii) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S1 iguais a:

→  $N_{Rd} = 197,236 \text{ kN}$       →  $N_{Sd} = -73,9 \text{ kN}$  (na equação de verificação da flexão composta entra com o valor positivo).

→  $M_{x,Rd} = 917,99 \text{ kN.cm}$       →  $M_{x,Sd} = 0,00 \text{ kN.cm}$

→  $M_{y,Rd} = 89,13 \text{ kN.cm}$       →  $M_{y,Sd} = 20 \text{ kN.cm}$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,37 + 0 + 0,22 = 0,59 \leq 1 - \text{Ok!}$$

(iv) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos tracionados índice de esbeltez limite deve ser igual a 300. Para o perfil S2 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{520}{7,3} = 71,2 \quad \text{ok}$$

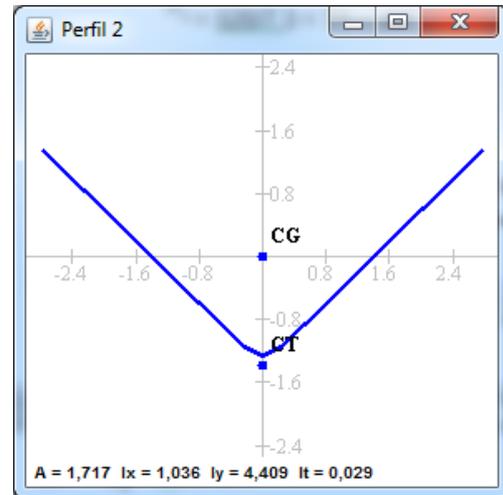
$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{92}{1,4} = 65,7 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

### 4.3 S3 / Diagonal / 2L 40x2,25

Características geométricas do perfil L 40x2,25 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

A= 1,717 cm <sup>2</sup>	
$I_x= 1,036 \text{ cm}^4$	$I_y=4,409 \text{ cm}^4$
$r_x= 0,77 \text{ cm}$	$r_y= 1,60 \text{ cm}$
$I_t= 0,029 \text{ cm}^4$	
$I_w= 0,0 \text{ cm}^6$	
$r_0= 2,255 \text{ cm}$	
$r_i= 3,3375 \text{ mm}$	$x_G=1,384 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	
$I_x$ e $I_y$ calculados nos eixos principais.	



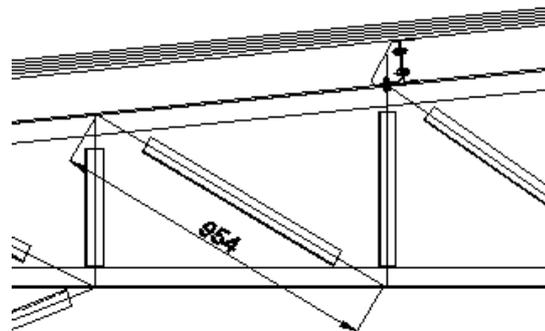
Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S3	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 006	N <sub>mín</sub>	-3,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 002	N <sub>máx</sub>	4,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = 95,4 \text{ cm}$

$L_y = 95,4 \text{ cm}$

$L_z = 95,4 \text{ cm}$



(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo  $N_e$  [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

Adota-se  $k_x = k_y = k_z = 1,0$ , para barras birrotuladas.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 95,63 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 22,47 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 43,78 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 35,75 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil monossimétrico em relação ao eixo X o valor de  $N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{exz}$ , logo  $N_e = 22,47 \text{ kN}$  e o modo de instabilidade global é por flexão em torno do eixo Y.

Assim, tem-se que o índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 1,354$$

Como  $\lambda_0 < 1,5$ , o fator de redução é dado por:  $\chi = 0,658^{\lambda_0} = 0,464$ . Logo a tensão de trabalho é igual a  $\sigma = \chi \cdot f_y = 11,14 \text{ kN/cm}^2$ .

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a  $1,717 \text{ cm}^2$ .

Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 15,94 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 15,94 \text{ kN} \geq N_{Sd} = 31,5 / 2 = 15,8 \text{ kN} - \text{ok!}$$

(no modelo proposto, os dois perfis trabalham independentes e cada um suporta a metade da esforço total solicitante)

### (i.2) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos comprimidos o índice de esbeltez limite deve ser igual a 200. Para o perfil S3 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{95,4}{0,77} = 123,9 \quad \text{ok}$$

$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{95,4}{1,6} = 59,6 \quad \text{ok}$$

### (ii) Barra submetida à tração [ABNT NBR 14762 – item 9.6]

#### (ii.1) Cálculo para o escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\lambda} = \frac{1,717 \cdot 24}{1,1} = 37,46 \text{ kN}$$

#### (ii.2) Cálculo para na seção líquida fora da região da ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{n0}f_u}{\lambda} = \frac{1,717.40}{1,35} = 50,87 \text{ kN}$$

(ii.3) Cálculo para na seção líquida na região da ligação:

Sendo a cantoneira soldada na treliça com comprimento de solda igual a  $L = 50$  mm e a excentricidade da ligação  $x = 10$  mm, tem-se que o coeficiente de redução de área líquida devido à excentricidade da ligação é dado por:

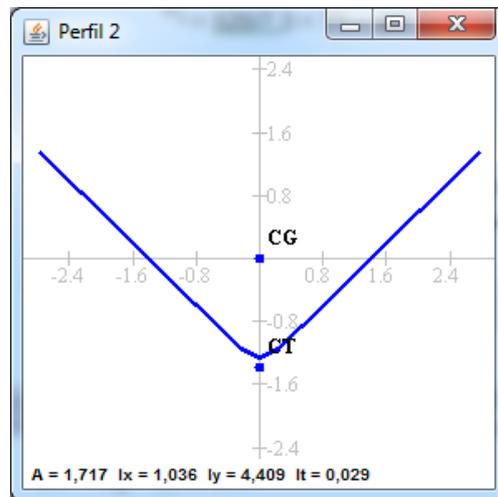
$$C_t = 1,0 - 1,2(x/L) = 0,76$$

Logo,

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\lambda} = \frac{0,76 \cdot 1,717 \cdot 40}{1,65} = 31,63$$

kN

A força axial resistente de cálculo é a menor entre as calculadas em (ii.1), (ii.2) e (ii.3). Portanto,  $N_{t,Rd} = 31,63$  kN



$$N_{t,Rd} = 31,63 \text{ kN} \geq N_{Sd} = 48,4 / 2 = 24,2 \text{ kN} - \text{ok!}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

#### 4.4 S4 / Montante / 2L 40x2,25

Características geométricas do perfil L 40x2,25 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$$A = 1,717 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 1,036 \text{ cm}^4 \quad I_y = 4,409 \text{ cm}^4$$

$$r_x = 0,77 \text{ cm} \quad r_y = 1,60 \text{ cm}$$

$$I_t = 0,029 \text{ cm}^4$$

$$I_w = 0,0 \text{ cm}^6$$

$$r_0 = 2,255 \text{ cm}$$

$$r_i = 3,3375 \text{ mm} \quad x_G = 1,384 \text{ cm}$$

$$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$$

$$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$$

$I_x$  e  $I_y$  calculados nos eixos principais.

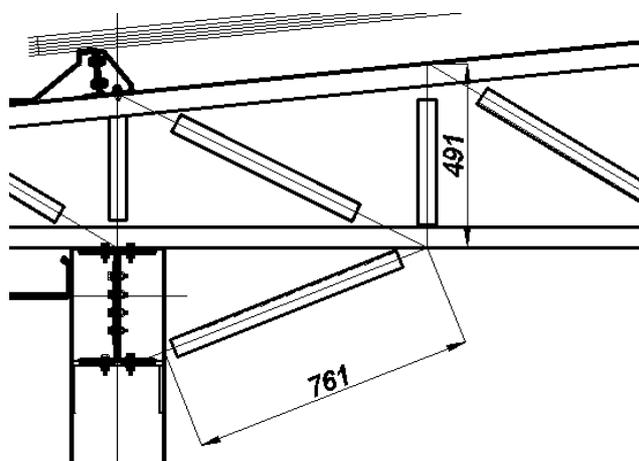
Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S4	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 006	N <sub>mín</sub>	-2,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Comb. 002	N <sub>máx</sub>	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Comprimento do perfil: L<sub>x</sub> = 49,1 cm

L<sub>y</sub> = 49,1 cm

L<sub>z</sub> = 49,1 cm



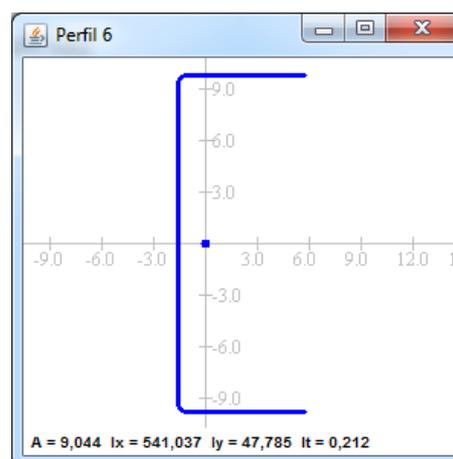
Verificação dispensada devido

aos cálculos realizados para S3: mesmo perfil, menor comprimento de flambagem L<sub>x</sub> e L<sub>y</sub> e menor esforço solicitante.

#### 4.5 S5 / Mão francesa / U 200x75x2,65

Características geométricas do perfil U 200x75x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

A= 9,04 cm <sup>2</sup>	
I <sub>x</sub> = 541,04 cm <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> =47,79 cm <sup>4</sup>
W <sub>x</sub> = 54,10 cm <sup>3</sup>	W <sub>y</sub> = 8,27 cm <sup>3</sup>
r <sub>x</sub> = 7,73 cm	r <sub>y</sub> = 2,30 cm
I <sub>t</sub> = 0,21 cm <sup>4</sup>	
I <sub>w</sub> = 3235,32 cm <sup>6</sup>	
r <sub>0</sub> = 9,084 cm	x <sub>0</sub> =4,172 cm
r <sub>i</sub> = 3,975 mm	x <sub>G</sub> =1,724 cm
f <sub>y</sub> = 24 kN/cm <sup>2</sup>	
E = 20000 kN/cm <sup>2</sup>	
G = 7700 kN/cm <sup>2</sup>	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S5	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 002	N <sub>mín</sub>	-6,16	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = 76$  cm

$L_y = 76$  cm

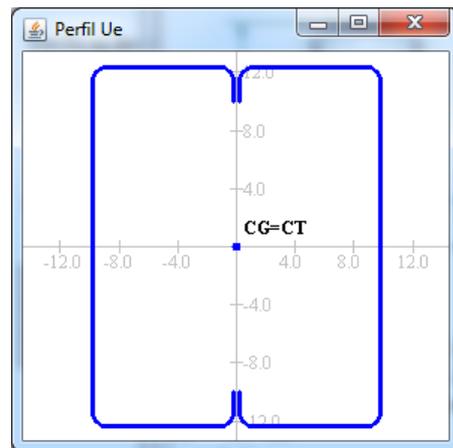
$L_z = 76$  cm

Verificação dispensada devido aos cálculos realizados para S1: mesmo perfil, menor comprimento de flambagem  $L_x$  e  $L_y$  e menor esforço solicitante.

#### 4.6 S6 / Pilar / [2Ue 250x100x25x4,75

Características geométricas da seção composta por dois perfis Ue 250x100x25x4,75 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 44,53 \text{ cm}^2$	
$I_x = 4241,02 \text{ cm}^4$	$I_y = 2903,29 \text{ cm}^4$
$W_x = 339,28 \text{ cm}^3$	$W_y = 283,59 \text{ cm}^3$
$r_x = 9,76 \text{ cm}$	$r_y = 8,07 \text{ cm}$
$I_t = 4937,29 \text{ cm}^4$	
$I_w = 0,0 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 12,666 \text{ cm}$	$x_0 = 0,0 \text{ cm}$
$r_i = 7,125 \text{ mm}$	$x_G = 0,0 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S1	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 006	$M_{x,máx}$	1,68	0,02	-2,87	0,00	-3,92	0,00
Comb. 002	$N_{mín}$	-8,97	-0,07	1,02	0,00	1,19	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = 300$  cm

$L_y = 300$  cm

$L_z = 300$  cm

Das duas combinações críticas acima, o perfil será dimensionado, neste exemplo, somente para a combinação mais desfavorável: comb.006.

(i) Barra submetida à tração [ABNT NBR 14762 – item 9.6]

(i.1) Cálculo para o escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\lambda} = \frac{44,53 \cdot 24}{1,1} = 971,65 \text{ kN}$$

(i.2) Cálculo para na seção líquida fora da região da ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{n0}f_u}{\lambda} = \frac{44,53.40}{1,35} = 1319,53 \text{ kN}$$

(i.3) Cálculo para na seção líquida na região da ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\lambda} = \frac{1,0.44,53.40}{1,65} = 1079,61 \text{ kN}$$

$C_t = 1,0$  (coeficiente de redução de área líquida devido à excentricidade da ligação – como neste caso trata-se de uma peça contínua a “ligação” é em todos os elementos do perfil).

A força axial resistente de cálculo é a menor entre as calculadas em (i.1), (i.2) e

(i.3). Portanto,  $N_{t,Rd} = 971,65 \text{ kN}$

(ii) Barras submetidas à flexão simples [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $Y = 12,5 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 4241,02 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 339,28 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 7402,50 \text{ kN.cm}$

(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

De acordo com o diagrama de momentos fletores do pilar, conforme mostra a Figura 24, o fator de modificação para momento fletor não uniforme ( $C_b$ ) é dado por, considerando os momentos fletores em módulo:

$$C_b = \frac{12,5M_{\text{máx}}}{2,5M_{\text{máx}} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$

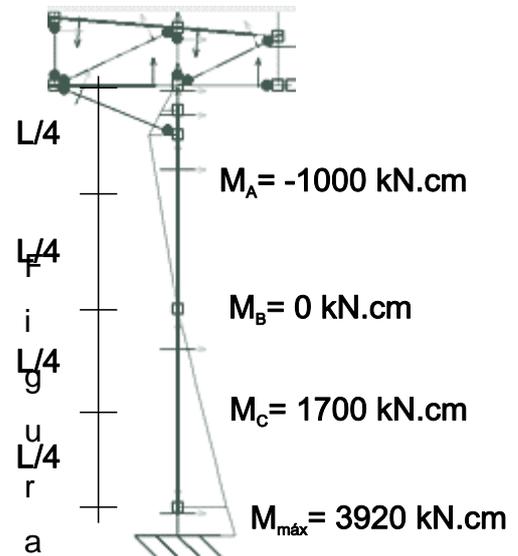
$$C_b = \frac{12,5.3920}{2,5.3920 + 3.1000 + 4.0 + 3.1700} = 2,737$$

Sendo as forças normais devido à instabilidade elástica:

Conforme ABNT NBR 8800:2008 E.2.1.3, em barras das subestruturas de contraventamento (entende-se por subestrutura de contraventamento como sendo uma parte da estrutura de uma edificação que é responsável para garantir a estabilidade horizontal da mesma) deve-se utilizar coeficiente de flambagem por flexão igual a 1, neste caso  $k_x = k_y = k_z = 1,0$ .

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 6367,63 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G.I_t \right] = 236973,83 \text{ kN}$$



24 – Diagrama de momentos fletores.

Assim, o momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas é dado por:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 1346645,81 \text{ kN.cm.}$$

O índice de esbelteza reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,078$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,0$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho

$$\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24 \text{ kN/cm}^2:$$

Máxima coordenada  $Y = 12,5 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 4241,02 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 339,28 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 7402,50 \text{ kN.cm}$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 7402,50 \text{ kN.cm}$ .

### (ii.3) Instabilidade distorcional

O momento fletor resistente de cálculo devido à instabilidade distorcional é dado por:

$$M_{Rd,dist} = \frac{\chi_{dist} W \cdot f_y}{1,1}$$

Por meio do programa DimPefil 4.0, o momento crítico de flambagem distorcional elástica é igual a:

$$M_{dist,x} = 14613 \text{ kN.cm} \quad (\text{momento crítico para um perfil})$$

$$M_{dist,x} = 29226 \text{ kN.cm} \quad (\text{momento crítico para dois perfis})$$

Assim, tem-se que o índice de esbelteza reduzido devido à instabilidade distorcional é dado por:

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} = 0,278$$

Como  $\lambda_{dist} < 0,673$ , o fator de redução é igual a  $\chi_{dist} = 1,0$ . Logo,

$$M_{Rd,dist} = 7402,50 \text{ kN.cm}$$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$ ,  $M_{Rd,FLT}$  e  $M_{Rd,dist}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 7402,50 \text{ kN.cm}$ .

### (iii) Barras submetidas à flexotração [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S1 iguais a:

$$\rightarrow N_{Rd} = 971,65 \text{ kN} \quad \rightarrow N_{Sd} = 16,8 \text{ kN}$$

$$\rightarrow M_{x,Rd} = 7405,50 \text{ kN.cm} \quad \rightarrow M_{x,Sd} = 3920 \text{ kN.cm}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,02 + 0,53 + 0 = 0,55 \leq 1 - \text{Ok!}$$

(iv) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos tracionados índice de esbeltez limite deve ser igual a 300. Para o perfil S6 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{300}{9,76} = 30,7 \quad \text{ok}$$

$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{300}{8,07} = 37,2 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

#### 4.7 S7 / Montante da testeira / ][ 2U100x50x2.65

O montante da testeira será formado por dois perfis U 100x50x2,65 mm com espaçamento de 6,3 mm. A Figura 25 mostra o montante da testeira em detalhe.

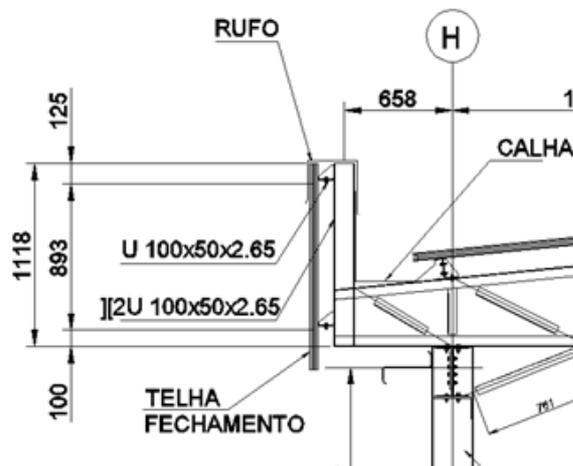
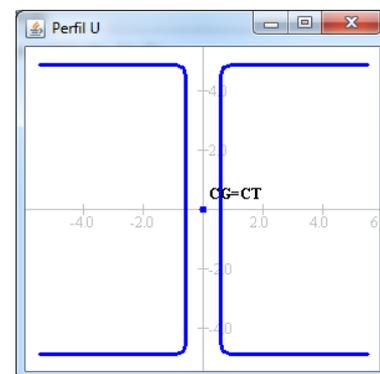


Figura 25 – Detalhe da testeira.

Características geométricas da seção composta por dois perfis U 100x50x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

Propriedades do perfil individual:

$A = 5,07 \text{ cm}^2$	$I_x = 79,31 \text{ cm}^4$
$I_y = 12,598 \text{ cm}^4$	$W_x = 15,86 \text{ cm}^3$
$W_y = 3,47 \text{ cm}^3$	$r_x = 3,95 \text{ cm}$
$r_y = 1,57 \text{ cm}$	$I_t = 0,118 \text{ cm}^4$
$I_w = 200,87 \text{ cm}^6$	$r_0 = 5,267 \text{ cm}$
$x_0 = 0,0 \text{ cm}$	$x_G = 0,0 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Combinação	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
	(t)	(t)	(t)	(t.m)	(t.m)	(t.m)
Comb. 007 <b>M<sub>x,máx</sub></b>	-0,21	0,01	0,28	0,00	0,36	0,01

(unidades: tf, tf.m)

Comprimento do perfil: L<sub>x</sub> = 111 cm

L<sub>z</sub> = 111 cm

L<sub>y</sub> = 111 cm

Para o cálculo dos esforços resistentes do perfil duplo, será realizado o cálculo dos esforços resistentes de um perfil simples que será multiplicado por 2. A consideração de perfis compostos por uma análise conjunta entre os perfis pode ser feita, porém depende da ligação entre perfis. A norma brasileira não fornece parâmetros de rigidez e resistência para análise da seção composta. Para calcular o perfil dessa forma, deve-se consultar outras bibliografias que oferecem procedimentos para o cálculo de seções compostas, como por exemplo Eurocode 3 Part 1-1, conforme indicação da NBR 14762:2010 item 9.7.5.

Elemento submetido à flexocompressão.

(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo N<sub>e</sub> [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 1270,622 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 201,834 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 148,88 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 142,63 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil monossimétrico em relação ao eixo X o valor de N<sub>e</sub> é o menor valor entre N<sub>ey</sub> e N<sub>exz</sub>, logo N<sub>e</sub> = 142,63 kN e o modo de instabilidade global é por flexotorção.

Assim, tem-se que o índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 0,924$$

Como  $\lambda_0 < 1,5$ , o fator de redução é dado por:  $\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,70$ . Logo a tensão de trabalho é igual a  $\sigma = \chi \cdot f_y = 16,80 \text{ kN/cm}^2$ .

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a  $4,873 \text{ cm}^2$ .

Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 68,22 \text{ kN} \quad \gamma = 1,2$$

Para os dois perfis a força normal resistente de cálculo é igual a  $136,44 \text{ kN}$ .

### (i.2) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(ii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo X [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

### (ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

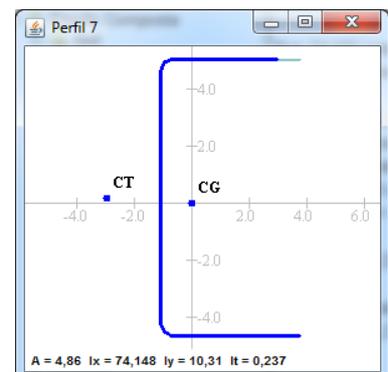
Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $Y = 5,209 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 74,148 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 14,234 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 310,57 \text{ kN.cm}$

Assim, o momento fletor resistente de cálculo para os dois perfis é igual a  $M_{Rd,esc} = 621,14 \text{ kN.cm}$



(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas é dado por:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

De acordo com o diagrama de momentos fletores, o coeficiente  $C_b$  é dado por:

$$C_b = \frac{12,5 \cdot 360}{2,5 \cdot 360 + 3 \cdot 270 + 4 \cdot 180 + 3 \cdot 90} \leq 3,0$$

$$C_b = 1,67$$

Logo, tem-se  $M_e = 1524,74 \text{ kN.cm}$ .

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,5$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,0$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$ :

Máxima coordenada  $Y = 5,209 \text{ cm}$  (fibra comprimida)  $I_{x,ef} = 74,148 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 14,234 \text{ cm}^3$

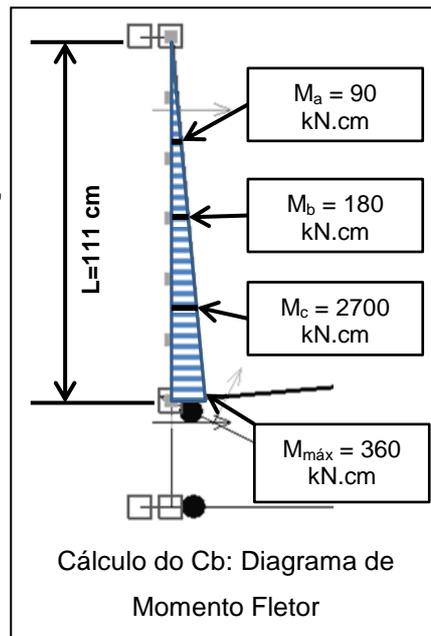
Logo,  $M_{Rd,esc} = 310,57 \text{ kN.cm}$

Assim, o momento fletor resistente de cálculo para os dois perfis é igual a  $M_{Rd,esc} = 621,14 \text{ kN.cm}$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 621,14 \text{ kN.cm}$ .

(ii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.



(iii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo Y [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(iii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $X = 3,406 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 10,275 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 3,017 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 65,83 \text{ kN.cm}$

Para os dois perfis,  $M_{Rd,esc} = 131,66 \text{ kN.cm}$

(iii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado por [ABNT NBR 14762 – Anexo E]:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

Como o momento fletor causa compressão na parte da seção com coordenada X positiva, tem-se  $C_s = -1,0$ . Sendo o elemento submetido à flexão com curvatura reversa  $C_m = +1,0$ . j é um parâmetro da seção transversal e vale  $6,879 \text{ cm}$ . Logo,

$$M_e = \frac{-1,0 \cdot 1270,62}{1,0} \left[ 5,833 - 1,0 \sqrt{5,833^2 + 5,267^2 \left( \frac{148,88}{1270,62} \right)} \right]$$

$$M_e = 345,96 \text{ kN.cm}$$

A fibra mais comprimida está a uma distância  $X = 5,0 - 1,372 = 3,628 \text{ cm}$  do centro geométrico do perfil. Assim, o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra mais comprimida é dado por:

$$W_c = \frac{I_y}{X} = \frac{12,598}{3,628} = 3,472 \text{ cm}^3$$

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,491$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,0$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24$  kN/cm<sup>2</sup>:

Máxima coordenada X= 3,406 cm (fibra comprimida)

$$W_{y,ef\_MLE} = 3,017 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 65,83$  kN.cm

Para os dois perfis,  $M_{Rd,esc} = 131,66$  kN.cm

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção Y é  $M_{y,Rd} = 131,66$  kN.cm.

### (iii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

### (iii) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S7 iguais a:

$$\rightarrow N_{Rd} = 136,44 \text{ kN} \quad \rightarrow N_{Sd} = 2,1 \text{ kN}$$

$$\rightarrow M_{x,Rd} = 621,14 \text{ kN.cm} \quad \rightarrow M_{x,Sd} = 360 \text{ kN.cm}$$

$$\rightarrow M_{y,Rd} = 131,66 \text{ kN.cm} \quad \rightarrow M_{y,Sd} = 10 \text{ kN.cm}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,015 + 0,58 + 0,076 = 0,671 \leq 1 - \text{Ok!} -$$

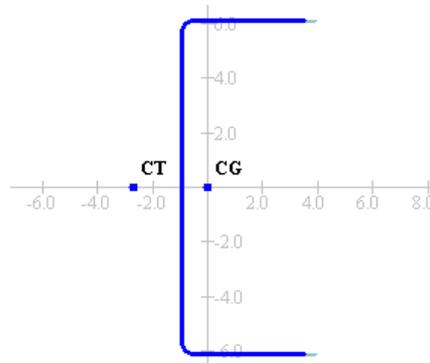
Nota: Na última versão da NBR 14762:2010, a verificação à flexão composta eliminou as chamadas “verificação de resistência” e “verificação de estabilidade” por uma única verificação à flexão composta mostrada anteriormente. A verificação da não linearidade geométrica da barra isolada, antes implícita na “verificação de estabilidade”, agora é considerada por meio da utilização dos coeficientes  $B_1$  e  $B_2$  no método para a amplificação dos esforços solicitantes (ABNT NBR 8800:2008 Anexo D), que deve ser realizado também para os perfis formados a frio conforme indicado no item 8.1 da ABNT NBR14762:2010.

#### 4.8 S8 / Terça de cobertura / U125x50x2.65

As terças são consideradas biapoiadas sobre as treliças conforme o detalhe da ligação apresentada na Figura 27.

Características geométricas do perfil U 125x50x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 5,732 \text{ cm}^2$	
$I_x = 133,55 \text{ cm}^4$	$I_y = 13,503 \text{ cm}^4$
$W_x = 21,37 \text{ cm}^3$	$W_y = 3,58 \text{ cm}^3$
$r_x = 4,827 \text{ cm}$	$r_y = 1,53 \text{ cm}$
$I_t = 0,134 \text{ cm}^4$	
$I_w = 344,854 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 5,809 \text{ cm}$	$x_0 = 2,84 \text{ cm}$
$r_i = 3,975 \text{ mm}$	$x_G = 1,23 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S1	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 002	M <sub>x,máx</sub>	-0,12	0,01	0,01	0,00	-0,23	0,01

Comprimento do perfil:  $L_x = 342 \text{ cm}$

$L_y = 171 \text{ cm}$

$L_z = 171 \text{ cm}$

As terças são travadas lateralmente pelas correntes conforme mostra a Figura 26.

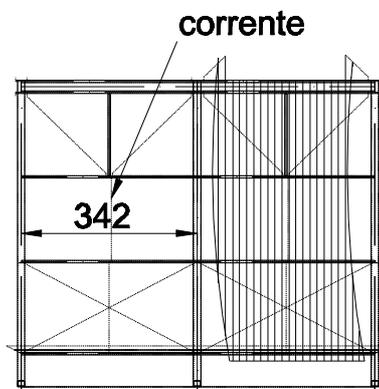


Figura 26 – Detalhe de um trecho da cobertura em planta.

(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo  $N_e$  [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

Conforme ABNT NBR 8800:2008 item E.2.1.2, em elementos contraventados, deve-se utilizar coeficiente de flambagem por flexão igual a 1, neste caso  $k_x = k_y = k_z = 1,0$ .

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 225,38 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 91,15 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 99,564 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 86,59 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil monossimétrico em relação ao eixo X o valor de  $N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{exz}$ , logo  $N_e = 86,59 \text{ kN}$  e o modo de instabilidade global é por flexotorção.

Assim, tem-se que o índice de esbelteza reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 1,26$$

Como  $\lambda_0 < 1,5$ , o fator de redução é dado por:  $\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,514$ . Logo a tensão de trabalho é igual a  $\sigma = \chi \cdot f_y = 12,34 \text{ kN/cm}^2$ .

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a  $5,732 \text{ cm}^2$ .

Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 58,94 \text{ kN} \quad \gamma = 1,2$$

(i.2) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(ii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo X [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $Y = 6,483 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 125,363 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 19,336 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 421,87 \text{ kN.cm}$

(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

As terças são biapoiadas sobre as treliças, conforme mostra a Figura 27, submetidas a um carregamento uniformemente distribuído e travada no meio do vão. Assim, para o cálculo do fator de modificação para momento fletor não uniforme ( $C_b$ ) tem-se, conforme mostra a Figura 28:

$$M_{\text{máx}} = \frac{qL^2}{8}; \quad M_A = \frac{7qL^2}{128} \quad (\text{a } L/8); \quad M_B = \frac{12qL^2}{128} \quad (\text{a } L/4); \quad M_C = \frac{15qL^2}{128} \quad (\text{a } 3L/8).$$

Logo,  $C_b = 1,3$ .

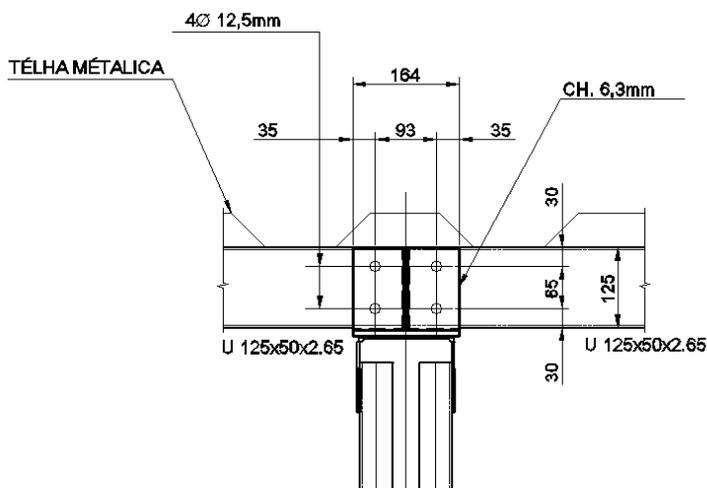


Figura 27 – Detalhe da ligação das terças sobre as treliças (articulada nos apoios).

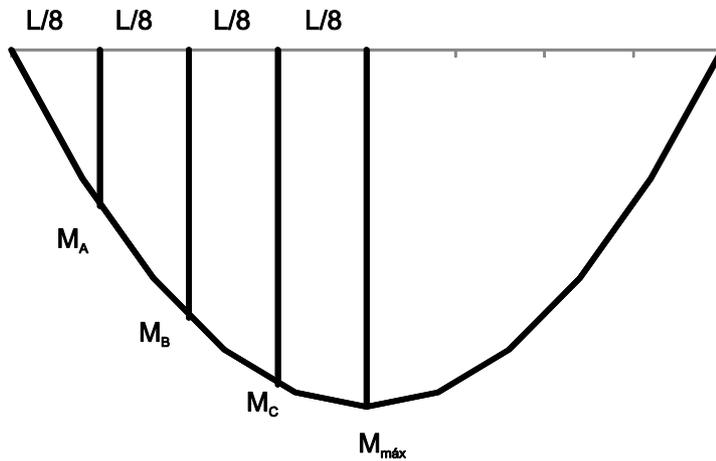


Figura 28 – Diagrama de momentos fletores.

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas é igual a:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 719,38 \text{ kN.cm.}$$

O índice de esbelteza reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,844$$

Como  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) = 0,89$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 21,36 \text{ kN/cm}^2$ :

Máxima coordenada  $Y = 6,439 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 126,93 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 19,71 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 382,82 \text{ kN.cm}$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 382,82 \text{ kN.cm}$ .

(ii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(iii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo Y [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(iii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada X= 3,524 cm (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 10,844 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 3,077 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 67,14 \text{ kN.cm}$

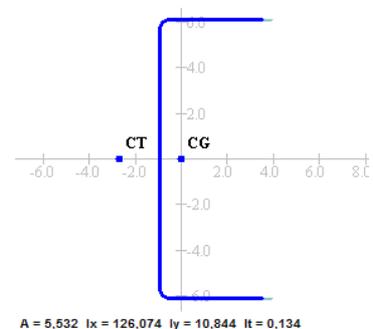
(iii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado por [ABNT NBR 14762 – Anexo E]:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

Como o momento fletor causa compressão na parte da seção com coordenada X positiva, tem-se  $C_s = -1,0$ . Sendo o elemento submetido à flexão com curvatura reversa  $C_m = +1,0$ . j é um parâmetro da seção transversal e vale 6,879 cm. Logo,

$$M_e = \frac{-1,0 \cdot 225,38}{1,0} \left[ 6,879 - 1,0 \sqrt{6,879^2 + 5,809^2 \left( \frac{99,564}{225,38} \right)} \right]$$



$$M_e = 224,57 \text{ kN.cm}$$

A fibra mais comprimida está a uma distância  $X=5,0-1,23= 3,77$  cm do centro geométrico do perfil. Assim, o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra mais comprimida é dado por:

$$W_c = \frac{I_y}{X} = \frac{13,503}{3,77} = 3,581 \text{ cm}^3$$

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,619$$

Como  $\lambda_0 > 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 0,992$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24$  kN/cm<sup>2</sup>:

Máxima coordenada  $X= 3,532$  cm (fibra comprimida)

$$W_{y,ef\_MLE} = 3,091 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

$$\text{Logo, } M_{Rd,FLT} = 66,89 \text{ kN.cm}$$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção Y é  $M_{y,Rd} = 66,89$  kN.cm.

### (iii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

### (iv) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S8 iguais a:

$$\begin{aligned} \rightarrow N_{Rd} &= 58,94 \text{ kN} & \rightarrow N_{Sd} &= 1,2 \text{ kN} \\ \rightarrow M_{x,Rd} &= 382,82 \text{ kN.cm} & \rightarrow M_{x,Sd} &= 230 \text{ kN.cm} \\ \rightarrow M_{y,Rd} &= 66,89 \text{ kN.cm} & \rightarrow M_{y,Sd} &= 10 \text{ kN.cm} \end{aligned}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,02 + 0,60 + 0,15 = 0,77 \leq 1 - \text{Ok!} -$$

(v) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos comprimidos o índice de esbeltez limite deve ser igual a 200.

Para o perfil S8 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{342}{4,827} = 70,8 \quad \text{ok}$$

$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{171}{1,53} = 111,7 \quad \text{ok}$$

(vi) Verificação do esforço cortante

$$V_d = 0,1 \text{ kN}$$

- Força Cortante [NBR 9.8.3]

$$h = 11,44 \text{ cm} \quad a = 342 \quad a/h > 3$$

$$k_v = 5 \quad h/t = 43,17$$

$$1,08 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}} = 69,714 > h/t = 43,17$$

$$\gamma = 1,1$$

$$A_w = 3,032 \text{ cm}^2$$

$$V_{Rd} = 39,69 \text{ kN}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

#### 4.9 S9 / Travamento horizontal da cobertura / L50x2,65

A Figura 29 mostra em detalhe o travamento horizontal da cobertura.

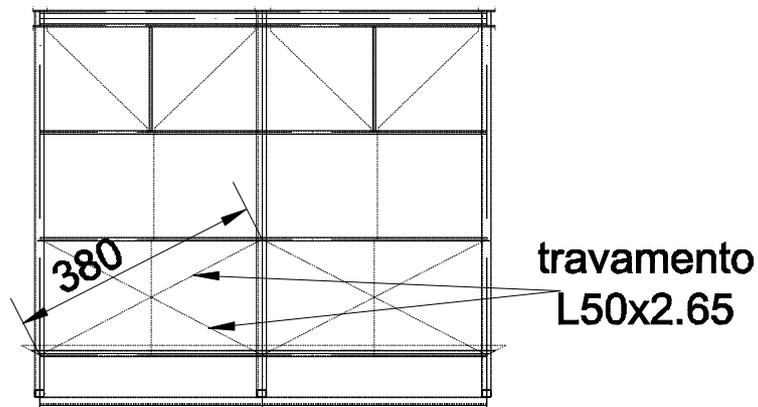


Figura 29 – Detalhe de um trecho da cobertura em planta.

Características geométricas do perfil L 50x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 2,535 \text{ cm}^2$
$r_x = 1,576 \text{ cm}$ $r_y = 1,576 \text{ cm}$
$r_{\min} = 0,974 \text{ cm}$
$r_i = 3,975 \text{ mm}$ $x_G = 1,24 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$

Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S9	N	$V_y$	$V_z$	$M_t$	$M_x$	$M_y$
Comb. 006	$N_{\max}$	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = 380 \text{ cm}$

$L_y = 380 \text{ cm}$

$L_{\min} = 190 \text{ cm}$

Obs: Travamento em "X" trabalha sempre à tração.

(i) Barra submetida à tração [ABNT NBR 14762 – item 9.6]

(i.1) Cálculo para o escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\lambda} = \frac{2,535.24}{1,1} = 55,3 \text{ kN}$$

(i.2) Cálculo para na seção líquida fora da região da ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{n0}f_u}{\lambda} = \frac{2,535.40}{1,35} = 75,1 \text{ kN}$$

(i.3) Cálculo para na seção líquida na região da ligação:

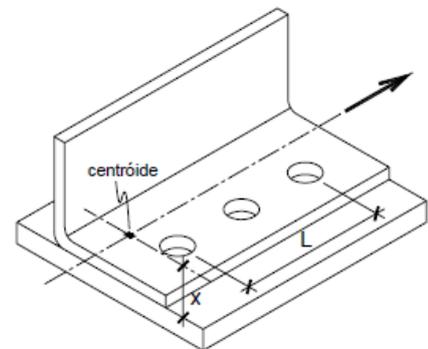
Será adotado dois parafusos espaçados de 50 mm.

$$C_t = 1,0 - 1,2(x/L) = 1,0 - 1,2(1,24/5) = 0,7$$

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\lambda} = \frac{0,7 \cdot 2,535 \cdot 40}{1,65} = 43,0 \text{ kN}$$

A força axial resistente de cálculo é a menor entre as calculadas em (i.1), (i.2) e (i.3). Portanto,  $N_{t,Rd} = 43,0 \text{ kN}$ .

$$N_{t,Rd} = 43,0 \text{ kN} > 8,3 \text{ kN} - \text{perfil ok!}$$



(ii) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos tracionados índice de esbeltez limite deve ser igual a 300. Para o perfil S9 tem-se que:

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{380}{1,576} = 241 \text{ ok}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{L}{r} = \frac{190}{0,974} = 195 \text{ ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado**

#### 4.10 S10 / Corrente rígida / L50x2.65

A Figura 30 mostra um detalhe da corrente.

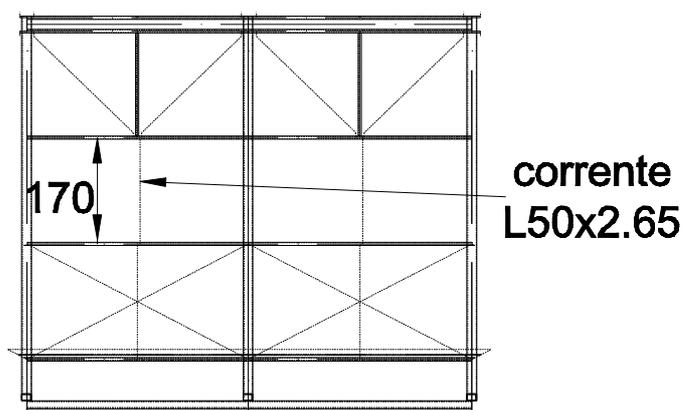


Figura 30 – Detalhe de um trecho da cobertura em planta.

Características geométricas do perfil L 50x2,65 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 2,535 \text{ cm}^2$
$r_x = 1,576 \text{ cm}$ $r_y = 1,576 \text{ cm}$
$r_{\min} = 0,974 \text{ cm}$
$r_i = 3,975 \text{ mm}$ $x_G = 1,24 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$

Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S10	N	$V_y$	$V_z$	$M_t$	$M_x$	$M_y$
Comb. 002	$N_{\min}$	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = 170 \text{ cm}$

$L_y = 170 \text{ cm}$

Essa peça funciona somente para travamento, deve ser verificada para a esbeltez mínima para compressão.

Os itens 4.11.2 e 4.11.3 da ABNT NBR 8800:2008 estabelecem as condições mínimas de esforço resistente das barras que trabalham somente como travamento de pilares e vigas. Não será abordado esse item.

(i) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos tracionados índice de esbeltez limite deve ser igual a 300. Para o perfil S10 tem-se que:

$$\lambda_{\min} = \frac{L}{r} = \frac{170}{0,974} = 174,5 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado**

**4.11 S11 / Longarina da testeira / U100x50x2,65**

A Figura 31 mostra em detalhe da longarina da testeira.

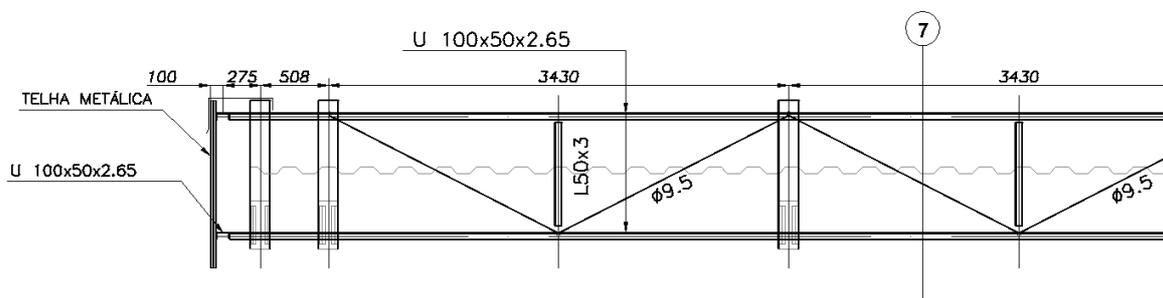
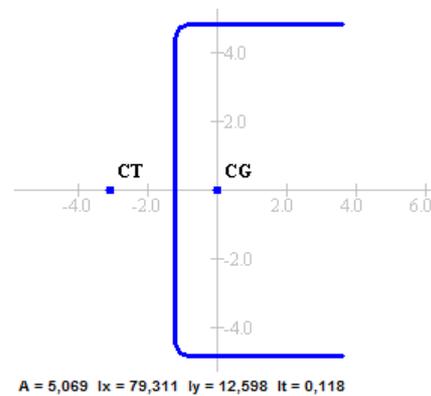


Figura 31 – Detalhe da longarina da testeira.

Características geométricas do perfil U 100x50x2,65 mm segundo o programa

DimPerfil 4.0:

$A = 5,069 \text{ cm}^2$	
$I_x = 79,311 \text{ cm}^4$	$I_y = 12,598 \text{ cm}^4$
$W_x = 15,862 \text{ cm}^3$	$W_y = 3,473 \text{ cm}^3$
$r_x = 3,955 \text{ cm}$	$r_y = 1,576 \text{ cm}$
$I_t = 0,118 \text{ cm}^4$	
$I_w = 200,872 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 5,267 \text{ cm}$	$x_0 = 3,1 \text{ cm}$
$r_i = 3,975 \text{ mm}$	$x_G = 1,372 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S1	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 009	M <sub>x,máx</sub>	-0,13	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01
Comb. 002	N <sub>mín</sub>	-1,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = 343$  cm

$L_y = 171$  cm

$L_z = 171$  cm

Das duas combinações críticas acima, o perfil será dimensionado, neste exemplo, somente para a combinação mais desfavorável: comb.009.

(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo  $N_e$  [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 133,068 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 85,043 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 81,632 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 62,543 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil monossimétrico em relação ao eixo X o valor de  $N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{exz}$ , logo  $N_e = 62,543$  kN e o modo de instabilidade global é por flexotorção.

Assim, tem-se que o índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 1,395$$

Como  $\lambda_0 < 1,5$ , o fator de redução é dado por:  $\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,443$ . Logo a tensão de trabalho é igual a  $\sigma = \chi \cdot f_y = 10,632$  kN/cm<sup>2</sup>.

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a 5,069 cm<sup>2</sup>.

Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 44,91 \text{ kN} \quad \gamma = 1,2$$

(i.2) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(ii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo X [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $Y = 5,209 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 74,148 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 14,234 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 310,56 \text{ kN.cm}$

(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

Conforme calculado no elemento S8, o fator de modificação para momento fletor não uniforme é igual a  $C_b = 1,3$ .

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas é igual a:

$$M_e = C_b \Gamma_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 570,95 \text{ kN.cm.}$$

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,817$$

Como  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) = 0,904$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 21,696 \text{ kN/cm}^2$ :

Máxima coordenada  $Y = 5,174 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 75,015 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 14,498 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 286,04 \text{ kN.cm}$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 286,04 \text{ kN.cm}$ .

### (ii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(iii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo Y [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

#### (iii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inércia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $X = 3,406 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 10,275 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 3,017 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 65,82 \text{ kN.cm}$

#### (iii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado por [ABNT NBR 14762 – Anexo E]:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

Como o momento fletor causa compressão na parte da seção com coordenada X positiva, tem-se  $C_s = -1,0$ . Sendo o elemento submetido à flexão com curvatura reversa  $C_m = +1,0$ . J é um parâmetro da seção transversal e vale 5,833 cm. Logo,

$$M_e = 174,759 \text{ kN.cm}$$

A fibra mais comprimida está a uma distância  $X = 5,0 - 1,372 = 3,628$  cm do centro geométrico do perfil. Assim, o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra mais comprimida é dado por:

$$W_c = \frac{I_y}{X} = \frac{12,598}{3,628} = 3,472 \text{ cm}^3$$

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,691$$

Como  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 0,963$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 23,108$  kN/cm<sup>2</sup>:

Máxima coordenada  $X = 3,406$  cm (fibra comprimida)

$$W_{y,ef\_MLE} = 3,017 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

$$\text{Logo, } M_{Rd,FLT} = 64,61 \text{ kN.cm}$$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção Y é  $M_{y,Rd} = 64,61$  kN.cm.

### (iii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(iv) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S11 iguais a:

$$\begin{aligned} \rightarrow N_{Rd} &= 44,91 \text{ kN} & \rightarrow N_{Sd} &= 1,3 \text{ kN} \\ \rightarrow M_{x,Rd} &= 286,04 \text{ kN.cm} & \rightarrow M_{x,Sd} &= 80 \text{ kN.cm} \\ \rightarrow M_{y,Rd} &= 64,61 \text{ kN.cm} & \rightarrow M_{y,Sd} &= 10 \text{ kN.cm} \end{aligned}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,03 + 0,28 + 0,15 = 0,46 \leq 1 - \text{Ok!} -$$

(v) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos comprimidos o índice de esbeltez limite deve ser igual a 200.

Para o perfil S8 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{343}{3,955} = 86,7 \quad \text{ok}$$

$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{171}{1,576} = 108,5 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

#### 4.12 S13 / Longarina de fechamento / Ue 300x85x25x3,00 mm

A Figura 32 mostra um detalhe da longarina de fechamento.

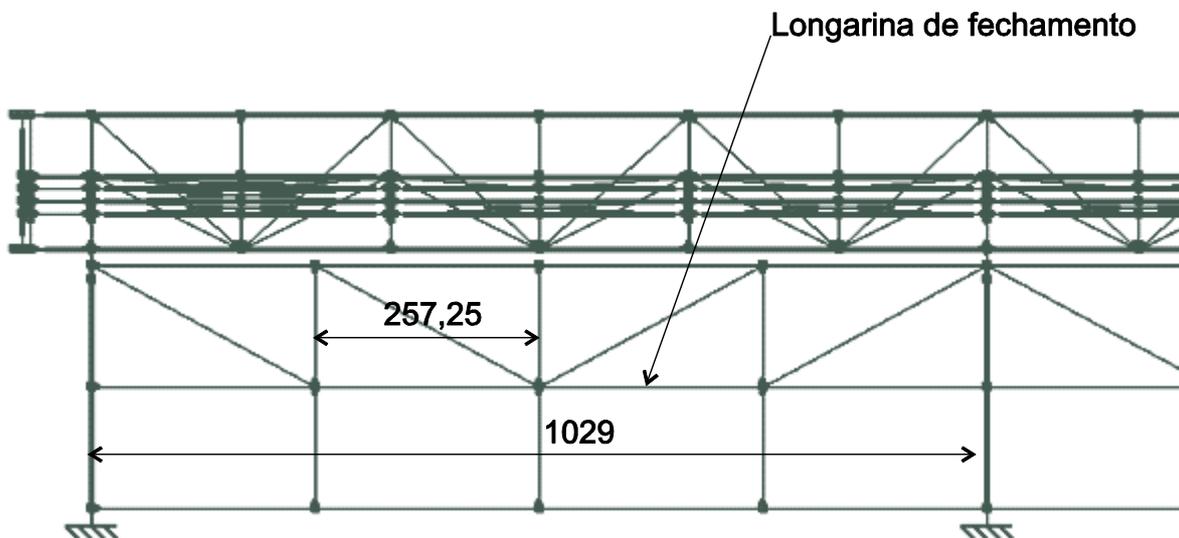
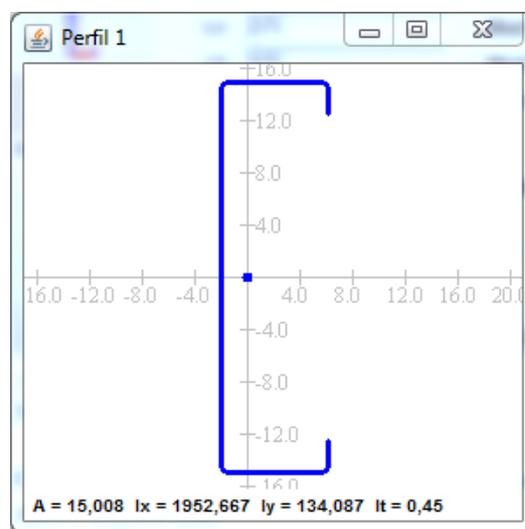


Figura 32 – Detalhe da longarina de fechamento.

Características geométricas do perfil Ue 300x85x25x3,00 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

$A = 15,0 \text{ cm}^2$	
$I_x = 1952,67 \text{ cm}^4$	$I_y = 134,08 \text{ cm}^4$
$W_x = 130,17 \text{ cm}^3$	$W_y = 21,28 \text{ cm}^3$
$r_x = 11,406 \text{ cm}$	$r_y = 2,989 \text{ cm}$
$I_t = 0,449 \text{ cm}^4$	
$I_w = 23366,27 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 13,01 \text{ cm}$	$x_0 = -5,495 \text{ cm}$
$x_G = -2,201 \text{ cm}$	
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S13	N	$V_y$	$V_z$	$M_t$	$M_x$	$M_y$
Comb. 003	$N_{\min}$	-0,18	-0,14	0,18	0,00	1,02	-0,26

Comprimento do perfil:  $L_x = 1029 \text{ cm}$

$L_y = 257,25 \text{ cm}$

$L_z = 257,25 \text{ cm}$

(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo  $N_e$  [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 364,022 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 399,949 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 276,483 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.1 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil ponto-simétrico em relação ao eixo X o valor de  $N_e$  é o menor valor entre  $N_{ex}$ ,  $N_{ey}$  e  $N_{ez}$ , logo  $N_e = 276,483 \text{ kN}$  e o modo de instabilidade global é por flexão em torno do eixo Y.

Assim, tem-se que o índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 1,141$$

Como  $\lambda_0 < 1,5$ , o fator de redução é dado por:  $\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,58$ . Logo a tensão de trabalho é igual a  $\sigma = \chi \cdot f_y = 13,91 \text{ kN/cm}^2$ .

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a  $11,781 \text{ cm}^2$ .

Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 136,59 \text{ kN} \quad \gamma = 1,2$$

(i.2) Instabilidade distorcional

O único método estabelecido pela ABNT NBR 14762:2010 para o cálculo da força resistente à distorção da seção requer o cálculo da força crítica distorcional elástica da seção. Essa força pode ser obtida por meio programa INSTAB (Pierin, 2011), o qual utiliza o método das faixas finitas (MFF). Para elaboração do programa de computador DimPerfil, foram cadastrados esses valores para as seções tabeladas

pela ABNT NBR 6355:2012. Observar que a força distorcional elástica resistente depende apenas da seção transversal e não depende do comprimento da peça.

Conforme a tabela de forças críticas pré-cadastradas a instabilidade distorcional não é crítica para esse perfil.

A força normal de compressão de cálculo deve ser o menor valor calculado entre  $N_{c,Rd}$  e  $N_{c,Rdist}$ . Assim,  $N_c = 136,59$  kN.

(ii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo X [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24$  kN/cm<sup>2</sup>):

Máxima coordenada  $Y = 15,78$  cm (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 1845,89 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 116,94 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 2551,45$  kN.cm

(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

As longarinas de fechamento são apoiadas sobre os pilares e travadas lateralmente a cada 257,25 cm. Assim, para a combinação em análise tem-se os seguintes momentos fletores:

$$M_{\text{máx}} = 1020; \quad M_A = 874; \quad M_B = 400; \quad M_C = 670.$$

Logo,  $C_b = 1,45$ .

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções ponto-simétricas é igual a:

$$M_e = 0,5 C_b \Gamma_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} = 7843,34 \text{ kN.cm.}$$

Segundo o item 9.8.2.2 da ABNT NBR 14762:2010, os valores  $N_{ey}$  e  $N_{ez}$  são obtidos em relação aos eixos principais de inércia.

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,63$$

Como  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) = 0,99$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 23,69 \text{ kN/cm}^2$ :

Máxima coordenada  $Y = 15,77 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 1847,79 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 117,17 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 2523,42 \text{ kN.cm}$

### (ii.3) Instabilidade distorcional

Valor de  $M_{dist,x}$  obtido da tabela de forças críticas pré cadastradas:

$$M_{dist,x} = 6778 \text{ kN.cm}$$

O índice de esbelteza reduzido associado à instabilidade distorcional

$$\lambda_{dist} = \left( \frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} = 0,679$$

Como  $\lambda_{dist} > 0,673$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade distorcional, é igual a  $\chi_{dist} = 0,995$

Logo, o momento fletor resistente de cálculo associado à instabilidade distorcional é dado por:

$$M_{Rdist} = \frac{\chi_{dist} W f_y}{\gamma} = 2827,83 \text{ kN.cm} \quad \gamma = 1,1$$

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$ ,  $M_{Rd,FLT}$  e  $M_{Rdist}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X é  $M_{x,Rd} = 2523,42 \text{ kN.cm}$ .

(iii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo Y [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(iii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $X = 6,3 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 134,09 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 21,29 \text{ cm}^3$$

$$\text{Logo, } M_{Rd,esc} = 464,45 \text{ kN.cm}$$

(iii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado por [ABNT NBR 14762 – Anexo E]:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

Como o momento fletor causa compressão na parte da seção com coordenada X positiva, tem-se  $C_s = -1,0$ . Sendo o elemento submetido à flexão com curvatura reversa  $C_m = +1,0$ . J é um parâmetro da seção transversal e vale  $16,02 \text{ cm}$ . Logo,

$$M_e = 1955,7 \text{ kN.cm}$$

A fibra mais comprimida está a uma distância  $X = 6,3 \text{ cm}$  do centro geométrico do perfil. Assim, o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra mais comprimida é dado por:

$$W_c = \frac{I_y}{X} = \frac{134,09}{6,3} = 21,29 \text{ cm}^3$$

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,51$$

Como  $\lambda_0 < 0,6$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,0$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 24$  kN/cm<sup>2</sup>:

Máxima coordenada X= 6,3 cm (fibra comprimida)

$$W_{y,ef\_MLE} = 21,29 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 464,45$  kN.cm

### (iii.3) Instabilidade distorcional

Conforme obtido da tabela de forças críticas pré cadastradas a distorção não é crítica para esse perfil.

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$ ,  $M_{Rd,FLT}$  e  $M_{Rdist}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção Y é  $M_{y,Rd} = 464,45$  kN.cm.

### (iv) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S13 iguais a:

$$\rightarrow N_{Rd} = 136,59 \text{ kN} \quad \rightarrow N_{Sd} = 1,8 \text{ kN}$$

$$\rightarrow M_{x,Rd} = 2523,42 \text{ kN.cm} \quad \rightarrow M_{x,Sd} = 1020 \text{ kN.cm}$$

$$\rightarrow M_{y,Rd} = 464,45 \text{ kN.cm} \quad \rightarrow M_{y,Sd} = 260 \text{ kN.cm}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,01 + 0,4 + 0,56 = 0,98 \leq 1 - \text{Ok!} -$$

(v) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos comprimidos o índice de esbeltez limite deve ser igual a 200.

Para o perfil S13 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{1029}{11,41} = 90,21 \quad \text{ok}$$

$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{257,25}{2,99} = 86,07 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

#### 4.13 S14 / Viga de cobertura / ][ 2U 300x100x3,35 mm

A viga de cobertura é biapoada sobre os pilares e contida lateralmente pelas tesouras conforme mostra a Figura 33.

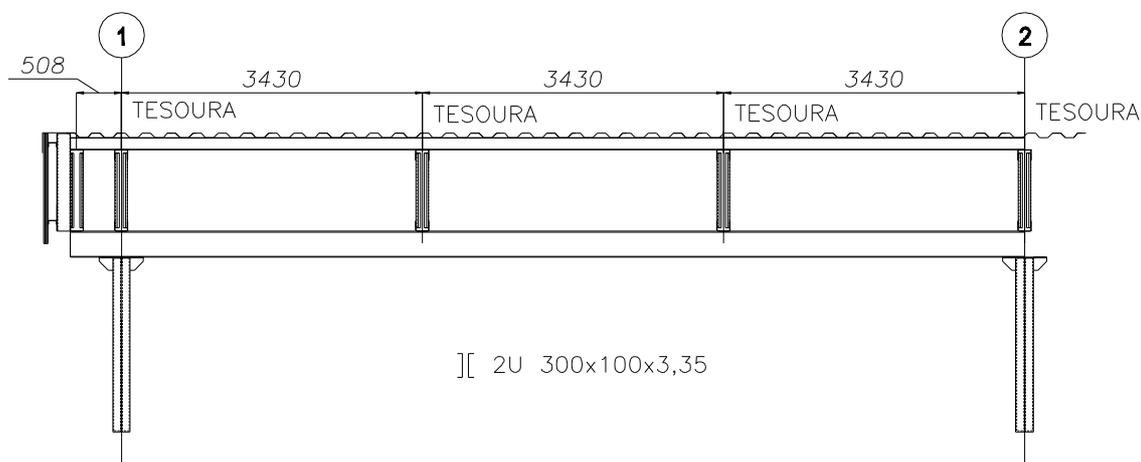
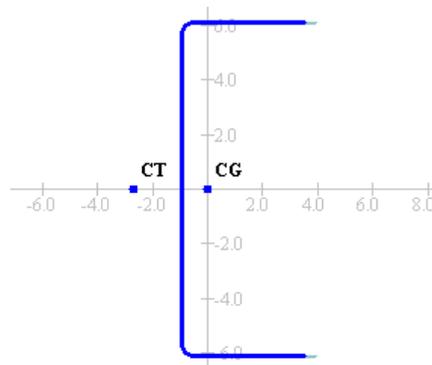


Figura 33 – Viga de cobertura.

Características geométricas do perfil U 300x100x3,35 mm segundo o programa DimPerfil 4.0:

Propriedades de um perfil	
$A = 16,381 \text{ cm}^2$	
$I_x = 2146,028 \text{ cm}^4$	$I_y = 148,312 \text{ cm}^4$
$W_x = 143,068 \text{ cm}^3$	$W_y = 18,882 \text{ cm}^3$
$r_x = 11,446 \text{ cm}$	$r_y = 3,01 \text{ cm}$
$I_t = 0,613 \text{ cm}^4$	
$I_w = 22941,808 \text{ cm}^6$	
$r_0 = 12,963 \text{ cm}$	$x_0 = 5,29 \text{ cm}$
$r_i = 5,025 \text{ mm}$	$x_G = 2,145 \text{ cm}$
$f_y = 24 \text{ kN/cm}^2$	
$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$	
$G = 7700 \text{ kN/cm}^2$	



Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S1	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 002	M <sub>x,máx</sub>	-0,90	0,01	1,44	0,00	-3,19	-0,01
Comb. 007	N <sub>mín</sub>	-1,34	0,01	0,10	0,00	-0,15	-0,05

Comprimento do perfil:  $L_x = 1029$  cm

$$L_y = 343$$
 cm

$$L_z = 343$$
 cm

(i) Barras submetidas à compressão centrada [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.7]

(i.1) Instabilidade da barra por flexão, por torção ou por flexotorção

Cálculo  $N_e$  [ABNT NBR 14762:2010 – itens 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3]

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = 400,068 \text{ kN} \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = 248,838 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 EI_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] = 257,15 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = 215,315 \text{ kN}$$

Segundo o item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 para perfil monossimétrico em relação ao eixo X o valor de  $N_e$  é o menor valor entre  $N_{ey}$  e  $N_{exz}$ , logo  $N_e = 215,315$  kN e o modo de instabilidade global é por flexotorção.

Assim, tem-se que o índice de esbeltez reduzido devido à instabilidade global é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right)^{0.5} = 1,351$$

Como  $\lambda_0 < 1,5$ , o fator de redução é dado por:  $\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,466$ . Logo a tensão de trabalho é igual a  $\sigma = \chi \cdot f_y = 11,18$  kN/cm<sup>2</sup>.

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, a área efetiva é igual a 12,368 cm<sup>2</sup>.

Logo, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = 115,19 \text{ kN} \quad \gamma = 1,2$$

Como a viga é composta por dois perfis, o esforço resistente deve ser multiplicado por 2. Assim,  $N_{c,Rd} = 230,39$  kN.

(i.2) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(ii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo X [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(ii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $Y = 16,371 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 1812,92 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 110,74 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 2416,15 \text{ kN.cm}$

Como a viga é composta por dois perfis, o esforço resistente deve ser multiplicado por 2. Assim,  $M_{Rd,esc} = 4832,3 \text{ kN}$ .

(ii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas é dado por:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5}$$

O fator de modificação para momento fletor não uniforme ( $C_b$ ) foi adotado igual a 1,0. Logo, tem-se  $M_e = 3278,93 \text{ kN.cm}$ .

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 1,023$$

Como  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) = 0,787$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 18,88 \text{ kN/cm}^2$ :

Máxima coordenada  $Y = 16,179 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{x,ef} = 1859,592 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{x,ef\_MLE} = 114,94 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 1973,27 \text{ kN.cm}$

Como a viga é composta por dois perfis, o esforço resistente deve ser multiplicado por 2. Assim,  $M_{Rd,FLT} = 3946,54 \text{ kN}$ .

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção X para a seção composta é  $M_{x,Rd} = 3946,54 \text{ N.cm}$ .

### (ii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(iii) Barras submetidas à flexão simples em torno do eixo Y [ABNT NBR 14762:2010 - item 9.8]

(iii.1) Início de escoamento da seção efetiva [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.1]

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,esc} = \frac{W_{ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho igual a resistência ao escoamento do aço ( $\sigma = 24 \text{ kN/cm}^2$ ):

Máxima coordenada  $X = 5,478 \text{ cm}$  (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 46,66 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 8,52 \text{ cm}^3$$

Logo,  $M_{Rd,esc} = 185,87 \text{ kN.cm}$

Como a viga é composta por dois perfis, o esforço resistente deve ser multiplicado por 2. Assim,  $M_{Rd,esc} = 371,75 \text{ kN}$ .

(iii.2) Instabilidade lateral com torção [ABNT NBR 14762 – item 9.8.2.2]

O momento fletor crítico de instabilidade lateral com torção, em regime elástico, para seções monossimétricas, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, é dado por [ABNT NBR 14762 – Anexo E]:

$$M_e = \frac{C_s N_{ex}}{C_m} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left( \frac{N_{ez}}{N_{ex}} \right)} \right]$$

Como o momento fletor causa compressão na parte da seção com coordenada X positiva, tem-se  $C_s = -1,0$ . Sendo o elemento submetido à flexão com curvatura reversa  $C_m = +1,0$ . J é um parâmetro da seção transversal e vale 16,92 cm. Logo,  $M_e = 1174,7$  kN.cm

O índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade lateral com torção é dado por:

$$\lambda_0 = \left( \frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} = 0,62$$

Como  $0,6 < \lambda_0 < 1,336$ , o fator de redução do momento fletor resistente, associado à instabilidade lateral com torção, é igual a  $\chi_{FLT} = 0,99$

Por meio do Método das Larguras Efetivas (MLE) e com o auxílio do programa DimPerfil 4.0, lembrando que a flexão ocorre em torno do eixo de menor inercia (eixo Y), se obtém o módulo de resistência efetiva na tensão de trabalho  $\sigma = \chi_{FLT} f_y = 23,78$  kN/cm<sup>2</sup>:

Máxima coordenada X = 5,49 cm (fibra comprimida)

$$I_{y,ef} = 47,1 \text{ cm}^4 \rightarrow W_{y,ef\_MLE} = 8,57 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo é dado por:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

Logo,  $M_{Rd,FLT} = 185,37$  kN.cm

Como a viga é composta por dois perfis, o esforço resistente deve ser multiplicado por 2. Assim,  $M_{Rd,FLT} = 370,74$  kN.

O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  deve ser o menor valor calculado entre  $M_{Rd,esc}$  e  $M_{Rd,FLT}$ . Assim, o momento fletor resistente na direção Y para a seção composta é  $M_{y,Rd} = 370,74$  kN.cm.

(iii.3) Instabilidade distorcional

Para os perfis não enrijecidos, tais como os perfis tipo L / U / Z, a Instabilidade distorcional elástica NÃO é crítica.

(iv) Barras submetidas à flexocompressão [ABNT NBR 14762 – item 9.9]

Sendo os esforços resistentes e solicitantes do elemento S8 iguais a:

$$\begin{aligned} \rightarrow N_{Rd} &= 230,39 \text{ kN} & \rightarrow N_{Sd} &= 9,0 \text{ kN} \\ \rightarrow M_{x,Rd} &= 3946,54 \text{ kN.cm} & \rightarrow M_{x,Sd} &= 3190 \text{ kN.cm} \\ \rightarrow M_{y,Rd} &= 370,74 \text{ kN.cm} & \rightarrow M_{y,Sd} &= 10 \text{ kN.cm} \end{aligned}$$

Deve ser satisfeita a seguinte inequação de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow 0,04 + 0,81 + 0,03 = 0,87 \leq 1 - \text{Ok!} -$$

(v) Verificação de esbeltez-limite

Para elementos comprimidos o índice de esbeltez limite deve ser igual a 200.

Para o perfil S8 tem-se que:

$$\lambda_x = \frac{L}{r} = \frac{1029}{11,446} = 89,9 \quad \text{ok}$$

$$\lambda_y = \frac{L}{r} = \frac{343}{3,01} = 113,9 \quad \text{ok}$$

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado!**

#### 4.14 S12 / Diagonal da testeira / $\Phi 9.0\text{mm}$

Barra redonda:  $A=0,7 \text{ cm}^2$

Esforços solicitantes (unidades: tf, tf.m):

Seção	S1	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>
Comb. 002	N <sub>máx</sub>	-0,13	0,02	0,14	0,00	0,08	0,01
Comb. 002	N <sub>máx</sub>	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Comprimento do perfil:  $L_x = L_y = 190$  cm

Conforme item 5.2.8.1 da ABNT NBR 8800:2008, barras redondas dispensam a verificação da esbeltez mínima, se forem pré-tracionadas, Nesse caso deve-se especificar no projeto que essas peças sejam submetidas à pré-tensão durante a montagem. Isso é facilmente executado, detalhando-se a ligação da barra com as extremidades rosqueadas, permitindo assim que o aperto das porcas produza a pré-tensão.

(i) Barra submetida à tração [ABNT NBR 8800:2008 – item 5.2.7]

Cálculo para o escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\lambda} = \frac{0,7.24}{1,1} = 15,2 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = 15,27 \text{ kN} > 9,0 \text{ kN} - \text{Ok!}$$

Segundo a ABNT NBR 8800:2008 deve-se verificar a ruptura da parte rosqueada. Item não abordado neste manual.

**Conclusão: O perfil pode ser utilizado**

Realização:



Av. Rio Branco, 181 - 28º andar  
Rio de Janeiro - RJ  
Telefone: (21) 3445-6300  
E-mail: [cbca@acobrasil.org.br](mailto:cbca@acobrasil.org.br)  
[www.cbca-acobrasil.org.br](http://www.cbca-acobrasil.org.br)

Gestor:



ISBN 978-85-89819-33-6



9 788589 819336