



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA**

**IZABELLA COLARES BITARELLO  
THAÍS FERNANDES AGUIAR MONTEIRO**

***PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS  
COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO  
ESTRUTURAL SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE  
COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008***

OURO BRANCO - MG

MARÇO - 2021



Universidade Federal  
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**IZABELLA COLARES BITARELLO  
THAÍS FERNANDES AGUIAR MONTEIRO**

***PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS  
COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO  
ESTRUTURAL SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE  
COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008***

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Graduação em Engenharia Civil,  
da Universidade Federal de São João  
del-Rei, Campus Alto Paraopeba,  
como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil

**Orientadora:** Ana Amélia Oliveira  
Mazon

OURO BRANCO - MG

MARÇO - 2021

**IZABELLA COLARES BITARELLO  
THAÍS FERNANDES AGUIAR MONTEIRO**

***PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS  
COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM  
AÇO ESTRUTURAL SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE  
COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR  
8800:2008***

***Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de  
Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-  
Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Civil.***

Aprovado em 26/03/2021

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Ana ~~Ana~~ Amélia Oliveira Mazon  
Professora Orientadora de TCC

---

Dalilah Pires Maximiano  
Professora da Engenharia Civil da UFSJ

---

Luca Roquete Amparo  
Professor da Engenharia Civil da UFSJ

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho a Deus, pois sem ele nada seria possível. Aos meus pais Joaquim e Valéria, e meus irmãos que sempre me apoiaram nos meus estudos. Dedico também aos amigos que contribuíram direta ou indiretamente e a professora Ana Amélia pela sua atenção dedicada ao longo do projeto, sempre com uma presença alegre e cheia de otimismo.*

*Thaís Fernandes Aguiar Monteiro*

*Dedico este projeto primeiramente à Deus, já que se não fosse ele eu não teria capacidade nem para desenvolvê-lo. À minha família: meus irmãos e meus pais, que sempre me incentivaram nos estudos e me deram apoio financeiro. Dedico também às minhas amigas da república Meia Taça, que me davam doses de motivação diárias para não desistir. Por fim, dedico à Ana Amélia, professora orientadora do projeto, que sempre se mostrou disposta de forma crítica e construtiva, à nos auxiliar em todo o processo da forma mais próxima possível.*

*Izabella Colares Bitarello*

## RESUMO

---

O presente trabalho tem como foco o dimensionamento de colunas em compressão simples, considerando os efeitos de flambagem por flexão e de flambagem local, compostas por perfis soldados em aço estrutural, com seções transversais I ou H, sem apoios intermediários, conforme prescrições da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008. Para o cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo para colunas com as características especificadas, foi elaborada uma planilha por meio do software Excel, de forma prática e didática, com a finalidade de auxiliar alunos de graduação e profissionais na escolha do perfil de aço que melhor atenda às necessidades de projeto. Para validação da planilha, foram realizados quatro estudos de casos. Em cada estudo de caso, comparou-se o estudo teórico com o cálculo realizado por meio da planilha. Foi observada similaridade nos resultados obtidos.

## SUMÁRIO

---

<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 Objetivo.....	2
<b>2. ANÁLISE TEÓRICA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>11</b>
3.1 Planilha para dimensionamento .....	11
3.1.1 Dados de entrada .....	12
3.1.2 Força resistente de cálculo .....	15
3.1.3 Limitação do índice de esbeltez .....	16
3.1.4 Cálculo de $N_e$ .....	16
3.1.5 Cálculo do $Q$ .....	17
3.1.6 Cálculo de $Q_s$ .....	17
3.1.7 Cálculo de $Q_a$ .....	18
3.1.8 Índice de esbeltez reduzido $\lambda_0$ .....	18
3.1.9 Fator de redução $\chi$ .....	18
3.2 Estudos de Casos.....	19
3.1.1 Primeiro estudo de caso .....	19
3.1.2 Segundo estudo de caso .....	24
3.1.3 Terceiro estudo de caso.....	30
3.1.4 Quarto estudo de caso .....	36
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>43</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Coluna de seção simples, flambagem global .....	10
Figura 2 – Coluna de seção simples, flambagem local.....	2
Figura 3 – Valor de $\chi$ em função do índice de esbeltez $\lambda_0$ .....	7
Figura 4 – Perfil analisado como placas isoladas .....	8
Figura 5 – Almas de seções I ou H .....	9
Figura 6 – Mesas de seções I ou H .....	9
Figura 7 – Propriedades do perfil .....	15
Figura 8 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados .....	15
Figura 9 – Coeficiente $\gamma_{a1}$ para diferentes combinações .....	16
Figura 10 – Elementos AA e AL .....	17
Figura 11 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso um .....	24
Figura 12 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso dois.....	30
Figura 13 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso três.....	36
Figura 14 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso quatro .....	41

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.....	5
Tabela 2 – Valor de $\chi$ em função do índice de esbeltez $\lambda_0$ .....	7



## LISTA DE ANEXOS

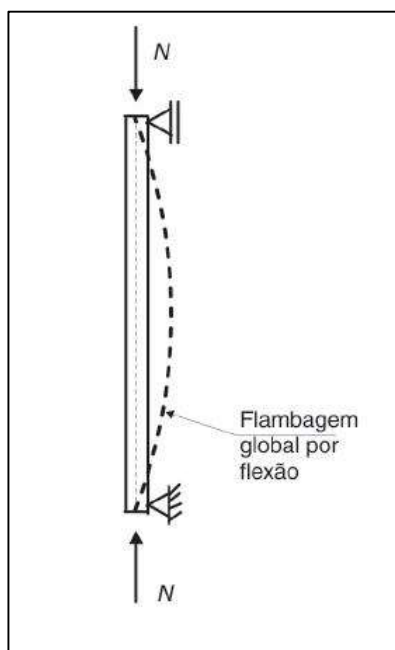
---

<b>ANEXO I</b> .....	<b>I</b>
Figura 1 – Aba 1: Dados de Entrada .....	I
Figura 2 – Aba 2: 1. Força resistente de cálculo .....	II
Figura 3 – Aba 3: 1.1 Limitação do Índice de Esbeltez .....	III
Figura 4 – Aba 4: 1.2 Cálculo de $N_e$ .....	IV
Figura 5 – Aba 5: 1.3 Cálculo do $Q$ .....	V
Figura 6 – Aba 6: 1.3.1 Cálculo de $Q_s$ .....	VI
Figura 7 – Aba 7: 1.3.2 Cálculo de $Q_a$ .....	VII
Figura 8 – Aba 8: 1.4 Índice de esbeltez reduzido .....	VIII
Figura 9 – Aba 9: 1.5 Fator de redução $\chi$ .....	IX

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Pfeil e Pfeil (2011), denomina-se coluna uma peça vertical sujeita à compressão centrada. Ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito. A flambagem por flexão ocasiona deslocamentos laterais, como pode ser observado na Figura 1, que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça em relação ao caso da peça tracionada. As peças comprimidas podem ser constituídas de seção simples ou de seção múltipla.

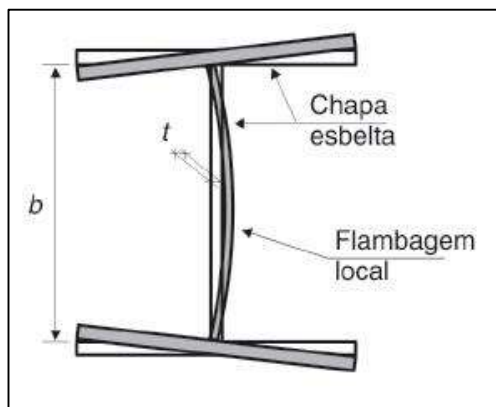
Figura 1 – Coluna de seção simples, flambagem global



Fonte: Estruturas de aço/Pfeil, Pfeil:2011.

Pfeil e Pfeil (2011) destacam que as chapas componentes de um perfil comprimido podem estar sujeitas à flambagem local, que é uma instabilidade caracterizada pelo aparecimento de deslocamentos transversais à chapa, na forma de ondulações, e sua ocorrência depende da esbeltez da chapa, Figura 2.

Figura 2 – Coluna de seção simples, flambagem local



Fonte: Estruturas de aço/Pfeil, Pfeil:2011.

O presente trabalho apresenta uma planilha de cálculo para o dimensionamento de colunas em compressão simples, considerando os efeitos de flambagem por flexão e de flambagem local, compostas por perfis soldados em aço estrutural, com seções transversais I ou H, sem apoios intermediários, conforme prescrições da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Essa planilha tem por finalidade auxiliar os alunos e profissionais, de forma simples e rápida, na escolha do perfil de aço que melhor atenda às suas necessidades de projeto. Dessa forma, é apresentado o procedimento para o dimensionamento de colunas submetidas à força axial de compressão, com as características especificadas para o trabalho em questão.

## 1.1 Objetivo

Dimensionamento de colunas sem apoios intermediários, compostas por perfis soldados em aço estrutural com seções transversais I ou H duplamente simétricas, submetidas à força axial de compressão, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

## 2. ANÁLISE TEÓRICA

Será apresentado ao longo deste tópico o critério de dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão segundo a ABNT NBR 8800:2008, considerando os efeitos de flambagem por flexão e de flambagem local, para as seções

transversais de perfis I ou H soldados, duplamente simétricos, objetos de estudo do presente trabalho.

O Item 5.3 da ABNT NBR 8800:2008, intitulado *Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão*, fornece a prescrição para o dimensionamento dessas barras, onde deve ser atendida a condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Onde:

- $N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão solicitante de cálculo;
- $N_{c,Rd}$  é a força axial de compressão resistente de cálculo.

Deve ser observada a condição relacionada à limitação da esbeltez. O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o produto KL e o raio de giração correspondente r, portanto  $KL/r$ , onde K é o coeficiente de flambagem global, e L é o comprimento destravado, não deve ser superior a 200.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 fornece a Equação (1) para o cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{al}} \quad (1)$$

Onde:

- $\chi$  é o fator de redução associado à resistência à compressão;
- $Q$  é o fator de redução total associado à flambagem local, obtido conforme Anexo F da ABNT NBR 8800:2008;
- $A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra;
- $f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;
- $\gamma_{al}$  é o coeficiente de ponderação da resistência.

O índice de esbeltez reduzido,  $\lambda_0$ , é dado pela Equação (2)

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (2)$$

Onde  $N_e$  é a força axial de flambagem elástica, obtida conforme o Anexo E da ABNT NBR 8800:2008. Para as seções transversais I ou H soldadas, com dupla simetria, a força axial de flambagem elástica,  $N_e$ , é dada por:

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

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2}$$

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

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2}$$

c) Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:

$$N_{ez} = \frac{I}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right]$$

Onde:

- $K_x L_x$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x (o coeficiente de flambagem  $K_x$  é dado em E.2.1 da ABNT NBR 8800:2008);
- $I_x$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;
- $K_y L_y$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y (o coeficiente de flambagem  $K_y$  é dado em E.2.1 da ABNT NBR 8800:2008);
- $I_y$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;
- $K_z L_z$  é o comprimento de flambagem por torção (o coeficiente de flambagem  $K_z$  é dado em E.2.2 da ABNT NBR 8800:2008);

- $E$  é o módulo de elasticidade do aço;
- $C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal;
- $G$  é o módulo de elasticidade transversal do aço;
- $J$  é a constante de torção da seção transversal;
- $r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento dado por:

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

Onde  $r_x$  e  $r_y$  são raios de giração em relação aos eixos centrais x e y, respectivamente, e  $x_0$  e  $y_0$  são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y, respetivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

O item E.2.1 da ABNT NBR 8800:2008 apresenta a Tabela 1, que fornece os valores teóricos do coeficiente de flambagem por flexão  $K_x$ , ou  $K_y$ , para seis casos ideais de condições de contorno de elementos isolados, nos quais a rotação e a translação das extremidades são totalmente livres ou totalmente impedidas. Devido à dificuldade prática de se materializarem as condições de apoio ideais, devem ser usados os valores recomendados apresentados.

Tabela 1 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

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

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

O coeficiente de flambagem por torção,  $K_z$ , função das condições de contorno, conforme o Item E.2.2 da ABNT NBR 8800:2008, deve ser determinado por análise estrutural, ou, simplificada, tomando igual a:

- a) 1,00, quando ambas as extremidades da barra possuírem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre;
- b) 2,00, quando uma das extremidades da barra possuir rotação em torno do eixo longitudinal e empenamentos livres e, a outra extremidade, rotação e empenamento impedidos.

A curva de flambagem é considerada pelo fator de redução associado à resistência à compressão,  $\chi$ , que é fornecido pela ABNT NBR 8800:2008 em função do valor do índice de esbeltez reduzido,  $\lambda_0$ :

- Para  $\lambda_0 \leq 1,5$ :

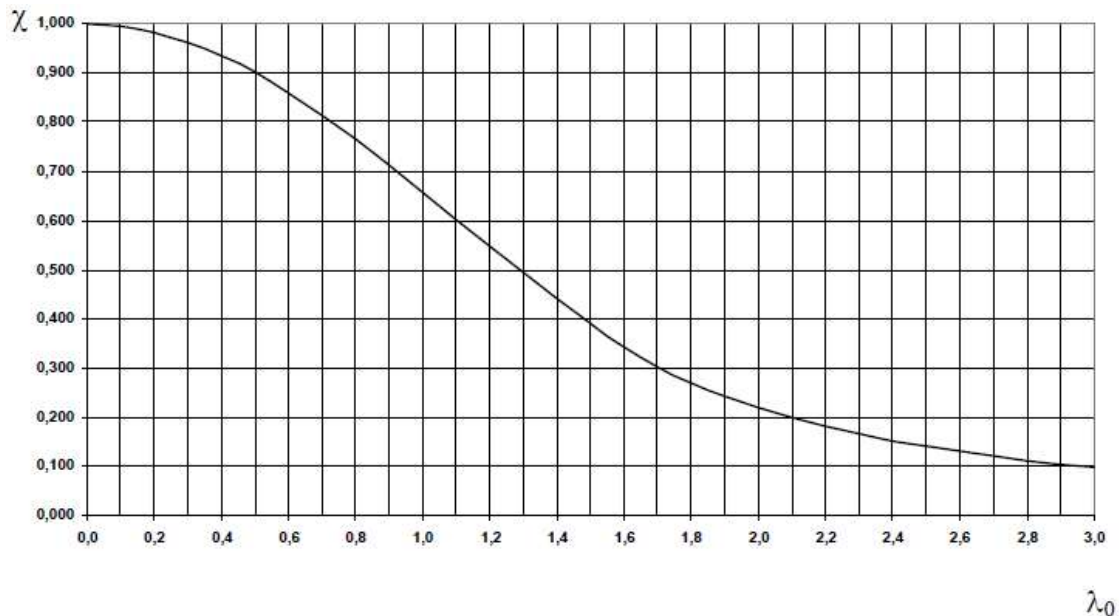
$$\chi = 0,658 \lambda_0^2$$

- Para  $\lambda_0 > 1,5$ :

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

Para os casos em que  $\lambda_0$  não supere 3,0, o valor de  $\chi$  pode ser também obtido pela Figura 11 ou pela Tabela 4 da NBR 8800:2008, aqui apresentadas na Figura 3 e na Tabela 2.

Figura 3 – Valor de  $\chi$  em função do índice de esbeltez  $\lambda_0$



Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

Tabela 2 – Valor de  $\chi$  em função do índice de esbeltez  $\lambda_0$

$\lambda_0$	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

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.



O fator de redução total associado à flambagem local,  $Q$ , é obtido conforme Anexo F da ABNT NBR 8800:2008.

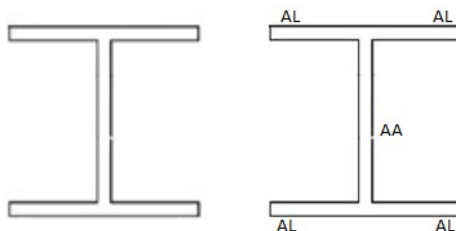
Segundo Pfeil e Pfeil (2011), denomina-se flambagem local a flambagem das placas componentes de um perfil comprimido, com deslocamentos laterais na forma de ondulações. A flambagem por flexão da coluna pode ocorrer de forma conjunta com a flambagem local, reduzindo a carga última da coluna.

Com relação à flambagem local, os perfis soldados I ou H em aço estrutural, são analisados como placas isoladas. Conforme Pfeil e Pfeil (2011) as placas componentes de um perfil são classificadas como:

- Placa não enrijecida - um bordo apoiado e outro livre; por isso são denominadas também por placas tipo AL (apoio-livre);
- Placa enrijecida - dois bordos apoiados, placas tipo AA.

Na Figura 4 pode ser observado o perfil em sua forma original e sua devida classificação como placas isoladas.

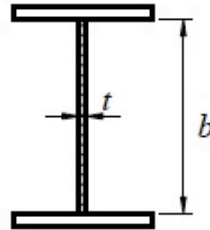
Figura 4 – Perfil analisado como placas isoladas



Fonte: autoria própria.

A Tabela F.1 da ABNT NBR 8800:2008 fornece os valores limites de esbeltez para diferentes tipos de elementos comprimidos. Considerando as seções I ou H soldadas de acordo com a Figura 5, o valor de  $(b/t)_{lim}$  para os elementos comprimidos AA é obtido por meio da Equação (3), que corresponde ao Grupo 2 dos Elementos AA da Tabela F.1.

Figura 5 – Almas de seções I ou H



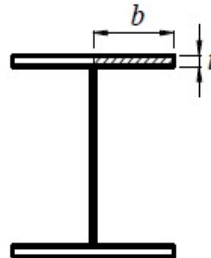
Fonte: Adaptada da Tabela F.1 da ABNT NBR 8800:2008.

Onde  $b$  é a altura da alma e  $t$  é a espessura da alma.

$$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3)$$

O valor de  $(b/t)_{lim}$  para os elementos comprimidos AL de acordo com a Figura 6 é obtido por meio da Equação (4), que corresponde ao Grupo 5 dos Elementos AL da Tabela F.1.

Figura 6 – Mesas de seções I ou H



Fonte: Adaptada da Tabela F.1 da ABNT NBR 8800:2008.

Sendo  $b$  a metade da largura da mesa e  $t$  é a espessura da mesa.

$$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad (4)$$

Onde o coeficiente  $k_c$  é dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76$$

No caso da relação  $b/t$  não ultrapassar o valor de  $(b/t)_{lim}$ , não há flambagem local e o valor do fator de redução total  $Q$  é igual à unidade. Caso contrário, se o valor de  $b/t$  ultrapassar o valor de  $(b/t)_{lim}$ , a flambagem local ocorre e o valor de  $Q$  é menor que a unidade, dado por:

$$Q = Q_s * Q_a$$

Onde  $Q_s$  e  $Q_a$  são fatores de redução que levam em conta a flambagem local dos elementos AL e AA, respectivamente.

O fator de redução  $Q_s$  para os elementos comprimidos AL de mesas de seções I ou H soldadas é determinado conforme o item F.2, letra c, da ABNT NBR 8800:2008:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \left(\frac{b}{t}\right) \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$$
$$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$$

O fator de redução  $Q_a$  para os elementos comprimidos AA de almas de seções I ou H soldadas é determinado conforme o item F.3 da ABNT NBR 8800:2008 e é dado por:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

Onde:

$A_g$  é a área bruta;

$A_{ef}$  é a área efetiva da seção transversal, dada por:  $A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) t$ .

A largura efetiva dos elementos AA,  $b_{ef}$ , é igual a:

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[ 1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b$$

Onde, para as seções transversais I ou H soldadas,  $c_a$  é um coeficiente igual a 0,34.

De forma conservadora, pode tomar:

$$\sigma = f_y$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Por meio de uma planilha elaborada no software Excel, é realizado o cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , para colunas sem apoios intermediários, compostas por perfis soldados em aço estrutural com seções transversais I ou H duplamente simétricas, submetidas à força axial de compressão, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

#### 3.1 Planilha para dimensionamento

A planilha para dimensionamento de colunas com as características especificadas no presente trabalho, foi elaborada de forma didática, com finalidade de tornar prática a sua utilização pelo usuário. Sendo assim, a planilha se encontra dividida em nove abas. A primeira aba, intitulada *Dados de entrada*, é destinada para entrada de dados pelo usuário, como as dimensões e propriedades mecânicas do perfil que compõe a coluna, condições de apoio e comprimento destravado. As outras oito abas seguintes foram divididas de forma a organizar, de maneira detalhada, o cálculo de todos os valores prescritos e necessários para o dimensionamento da coluna comprimida estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008. Além disso, pensando na praticidade e no conforto do usuário, em cada aba há uma seta que permite o avanço para a aba subsequente ou a regressão para a aba antecedente, de forma simples e direta. Também há um ícone chamado “*Início*” que permite o acesso direto e rápido à primeira aba da planilha: a de inserção de dados.

As abas receberam as seguintes nomenclaturas, sendo estas descritas de forma detalhada nos próximos tópicos:

- Aba 1: Dados de entrada;
- Aba 2: 1. Força resistente de cálculo;
- Aba 3: 1.1. Limite de esbeltez;
- Aba 4: 1.2. Cálculo de  $N_e$ ;
- Aba 5: 1.3. Cálculo do  $Q$ ;
- Aba 6: 1.3.1. Cálculo de  $Q_s$ ;
- Aba 7: 1.3.2. Cálculo de  $Q_a$ ;
- Aba 8: 1.4. Índice de esbeltez reduzido;
- Aba 9: 1.5. Fator de redução  $\chi$ .

Para fins de conhecimento e maiores detalhes, as abas da planilha são apresentadas no Anexo 1. A planilha foi estruturada estrategicamente para que o usuário possa inserir apenas os dados de entrada, mantendo as demais células inalteradas. Essa proteção se faz importante para que o usuário não faça alterações por engano e o resultado final seja garantido.

### 3.1.1 Dados de entrada

Nesta aba, o usuário deve fornecer os dados de entrada da coluna para o dimensionamento, que foram organizados nos seguintes campos:

- Propriedades do Perfil;
- Propriedades mecânicas do Aço;
- Dimensões do Perfil;
- Dados da Coluna sem apoios intermediários;
- Comprimento destravado.

As propriedades dos perfis I ou H, de maneira geral, estão disponíveis em catálogos de perfis estruturais fornecidos pelas fábricas, e, as propriedades mecânicas do aço estrutural, na

norma ABNT NBR 8800:2008. Ressalta-se que no campo Dados da Coluna sem apoios intermediários, está apresentada uma tabela adaptada da norma ABNT NBR 8800:2008, que apresenta os valores teóricos e recomendados dos coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados. Sugere-se que o usuário consulte a ABNT NBR 8800:2008 para avaliar a forma mais adequada para os valores de  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ , de acordo com as condições de apoio da coluna que se pretende dimensionar utilizando a planilha. No *Comprimento destravado*, devem ser informados o comprimento destravado da coluna com relação aos eixos x e y, referentes à seção transversal do perfil, e ao eixo longitudinal z.

Destaca-se a importância da atenção com relação à unidade especificada para cada um dos dados de entrada.

No canto direito da aba foram criados tópicos, que, de forma visual, facilitam a compreensão sobre a organização de todas as etapas do dimensionamento, e contêm hiperlinks que possibilitam o acesso e trânsito entre todas as abas, de forma prática e ágil.

De forma detalhada, para o dimensionamento, faz-se necessário a entrada das seguintes informações:

➤ Propriedades do Perfil:

- $A_g$  = área bruta da seção transversal;
- $I_x$  = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;
- $I_y$  = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;
- $r_x$  = raio de giração em relação ao eixo central x;
- $r_y$  = raio de giração em relação ao eixo central y;
- $J$  = constante de torção da seção transversal;
- $C_w$  = constante de empenamento da seção transversal;

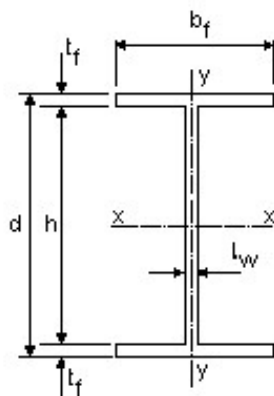
➤ Propriedades mecânicas do Aço (MPa):

- $E$  = módulo de elasticidade do aço;
- $G$  = módulo de elasticidade transversal do aço;

- $f_y$  = resistência ao escoamento do aço.
  
- Dimensões do Perfil (mm):
  - $b_f$  = largura da mesa;
  - $t_f$  = espessura da mesa;
  - $d$  = altura total da seção;
  - $h$  = altura da alma;
  - $t_w$  = espessura da alma.
  
- Dados da coluna sem Apoios Intermediários:
  - $K_x$  = Coeficiente de flambagem por flexão em relação ao eixo x;
  - $K_y$  = Coeficiente de flambagem por flexão em relação ao eixo y;
  - $K_z$  = Coeficiente de flambagem por torção em relação ao eixo z.
  
- Comprimento destravado (m):
  - $L_x$  = comprimento destravado em x;
  - $L_y$  = comprimento destravado em y;
  - $L_z$  = comprimento destravado em z.

Para praticidade e conforto do usuário, foram inseridas figuras que ilustram de forma didática e visual as nomenclaturas utilizadas na planilha, também informações sobre os dados de entrada que devem ser inseridos pelo usuário. A Figura 7 ilustra a nomenclatura utilizada para especificar as dimensões da seção transversal do perfil I ou H.

Figura 7 – Propriedades do perfil



Fonte: Portal Metálica: 2019.

A Figura 8 foi inserida na planilha com o objetivo de orientar o usuário sobre a avaliação em relação ao coeficiente de flambagem por flexão em elementos isolados. Conforme a ABNT NBR 8800:2008, caso não se possa assegurar a perfeição do engaste, devem ser usados os valores recomendados apresentados.

Figura 8 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados

Valores teóricos de $K_x$ ou $K_y$					
0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados					
0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

### 3.1.2 Força resistente de cálculo

Nesta aba é calculada e apresentada a força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , ou seja, o resultado final do dimensionamento da coluna sem apoios intermediários,



composta por perfil soldado em aço estrutural, com seção transversal I ou H duplamente simétricas, submetidas à força axial de compressão, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008. Ressalta-se que para a obtenção deste resultado faz-se necessário as etapas de cálculo nas abas posteriores.

O coeficiente de ponderação da resistência  $\gamma_{a1}$  é considerado na planilha igual a 1,10 para combinações normais, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, porém, se o usuário desejar outro tipo de combinação será possível modificá-lo. A Figura 9 foi inserida na planilha para melhor orientação do usuário em relação as demais combinações.

Figura 9 – Coeficiente  $\gamma_{a1}$  para diferentes combinações

Combinações	$\gamma_{a1}$
Normais	1,1
Especiais ou de construção	1,1
Excepcionais	1,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

### 3.1.3 Limitação do índice de esbeltez

Nesta aba é realizada a avaliação sobre a limitação do índice de esbeltez. Conforme a ABNT NBR 8800:2008, o índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o produto  $KL$  e o raio de giração correspondente  $r$ , portanto  $KL/r$ , onde  $K$  é o coeficiente de flambagem, e  $L$  é o comprimento destravado, não deve ser superior a 200. É importante atender essa solicitação da ABNT NBR 8800:2008.

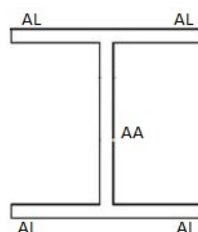
### 3.1.4 Cálculo de $N_e$

O valor da força axial de flambagem elástica,  $N_e$ , é tomado como o menor entre os valores obtidos para a flambagem por flexão: em relação ao eixo central de inércia  $x$  da seção transversal,  $N_{ex}$ , para a flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia  $y$  da seção transversal,  $N_{ey}$ , e para a flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal  $z$ ,  $N_{ez}$ .

### 3.1.5 Cálculo do $Q$

Nesta aba, apresenta-se o valor calculado para o fator de redução total associado à flambagem local,  $Q$ . Para melhor organização, os valores de  $Q_s$  e  $Q_a$ , fatores de redução que levam em conta a flambagem local dos elementos AL (apenas uma borda longitudinal vinculada) e AA (duas bordas longitudinais vinculadas), respectivamente, são calculados em duas abas separadas. Para título de ilustração, a Figura 10 apresenta os elementos AL e o elemento AA para perfis de seção transversal I ou H.

Figura 10 – Elementos AA e AL



Fonte: Autoria própria.

### 3.1.6 Cálculo de $Q_s$

$Q_s$  é o Fator de redução que leva em consideração a flambagem local para elementos AL, utilizado no cálculo de  $Q$  como mencionado no tópico 3.1.5. Faz-se necessário ressaltar que essa aba possui condições diferentes caso ocorra a flambagem local, ou seja,  $Q_s < 1$ . Neste caso, o cálculo de  $Q_s$  pode ser de duas formas, portanto foi destacado a cor das condições que devem ser respeitadas para obtenção do resultado correto.

Vale ressaltar o fato de que os cálculos para as demais condições são realizados de forma automática, independente de qual condição que o fator de redução for enquadrado. Contudo, para que não haja dúvidas de qual foi o resultado obtido e utilizado no dimensionamento, há uma célula em destaque com a escrita em cores diferentes dentro da aba que chama a atenção para resultado final.

### 3.1.7 Cálculo de $Q_a$

Outro fator de redução utilizado no cálculo de  $Q$  que leva em consideração a flambagem local é o  $Q_a$ , já mencionado no tópico 3.1.5. Diferente do cálculo de  $Q_s$ , quando  $Q_a < 1$  só há uma condição para o seu cálculo. Ressalta-se que os cálculos são realizados de forma automática, independente de qual condição que o fator de redução for enquadrado, porém para que não haja dúvidas, há uma célula em destaque com a escrita em cores diferentes dentro da aba que chama a atenção para resultado final.

### 3.1.8 Índice de esbeltez reduzido $\lambda_0$

A aba correspondente ao cálculo do índice de esbeltez reduzido,  $\lambda_0$ , apresenta o seu resultado considerando os valores de:  $A_g$  e de  $f_y$ , sendo respectivamente área bruta da seção transversal e resistência ao escoamento do aço à tensão normal, ambos inseridos nos dados de entrada;  $N_e$  adotado através do cálculo da aba 1.2. *Cálculo de  $N_e$* ; e  $Q$  adotado através do cálculo da aba 1.3. *Cálculo do  $Q$* . Seu resultado é obtido de forma direta através das substituições.

### 3.1.9 Fator de redução $\chi$

Nesta aba é calculado o fator de redução  $\chi$ , que depende diretamente do cálculo da aba 1.4. *Índice de Esbeltez Reduzido*. É importante observar as condições destacadas, pois caso este índice seja  $\leq 1,5$ , utiliza-se uma fórmula para  $\chi$ , caso  $\lambda_0 > 1,5$ , outra fórmula é utilizada para esta componente do cálculo.

Vale ressaltar o fato de que os dois cálculos são realizados de forma automática, independente de qual condição que o índice de esbeltez for enquadrado. Contudo, apenas o cálculo que satisfaz à condição do caso em questão será evidenciado e destacado ao final da sequência do cálculo.

## 3.2 Estudos de Casos

Para validação da planilha elaborada por meio do software Excel, serão apresentados quatro estudos de caso. Será apresentado o dimensionamento teórico de cada caso, posteriormente comparado com o dimensionamento realizado por meio da planilha. Para tanto, serão considerados diferentes perfis soldados do catálogo da empresa FAM - Construções Metálicas Pesadas de série CS (coluna soldada, base igual à altura) e CVS (colunas e vigas soldadas, base diferente da altura).

### 3.1.1 Primeiro estudo de caso

O Primeiro Estudo de Caso apresenta a resistência de cálculo à compressão de uma coluna de 6,0 m de comprimento, composta pelo perfil soldado CS 600x250, fabricado em aço MR250. As condições de apoio da coluna foram consideradas em relação ao eixo x, como engastada na base e rotulada no topo, e em relação ao eixo y, como engastada na base e livre no topo. Resistência de cálculo à compressão por meio de análise teórica:

Propriedades do perfil:

- $A_g = 317,9 \text{ cm}^2$ ;
- $I_x = 216146 \text{ cm}^4$ ;
- $I_y = 68419 \text{ cm}^4$ ;
- $r_x = 26,08 \text{ cm}$ ;
- $r_y = 14,67 \text{ cm}$ ;
- $J = 354 \text{ cm}^4$ ;
- $C_w = 57722931 \text{ cm}^6$ ;
- $r_0 = 29,92 \text{ cm}$ .

Propriedades mecânicas do aço:

- $E = 200000 \text{ MPa}$ ;
- $G = 77000 \text{ MPa}$ ;
- $f_y = 250 \text{ MPa}$ .

Dimensões do Perfil:

- $b_f = 600 \text{ mm}$ ;
- $t_f = 19 \text{ mm}$ ;
- $d = 600 \text{ mm}$ ;
- $h = 562 \text{ mm}$ ;
- $t_w = 16 \text{ mm}$ .

Dados da coluna sem apoio intermediário:

- $K_x = 0,8$ ;
- $K_y = 2,1$ ;
- $K_z = 2,0$ .

- Comprimento destravado:

- $L_x = 6,0 \text{ m}$ ;
- $L_y = 6,0 \text{ m}$ ;
- $L_z = 6,0 \text{ m}$ .

**Força axial resistente de cálculo (item 5.3.2)**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

**Limitação do índice de esbeltez (item 5.3.4)**

Verificando a condição de limite de esbeltez  $\leq 200$ .

$$\frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{0,8 * 6,0}{26,08 * 10^{-2}} = 18,405 \text{ OK!}$$

$$\frac{K_y L_y}{r_y} = \frac{2,1 * 6,0}{14,67 * 10^{-2}} = 85,890 \text{ OK!}$$

**Cálculo de Ne – Força axial de flambagem elástica (anexo E)**

- Flambagem por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 216146 * 10^{-8}}{(0,8 * 6,0)^2} = 185180,17 \text{ kN}$$

- Flambagem por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 68419 * 10^{-8}}{(2,1 * 6,0)^2} = 8506,78 \text{ kN}$$

- Flambagem por torção em relação ao eixo z:

$$N_{ez} = \frac{I}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right]$$

$$N_{ez} = \frac{I}{(29,92 * 10^{-2})^2} \left[ \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 57722931 * 10^{-12}}{(2 * 6,0)^2} + 77 * 10^9 * 354 * 10^{-8} \right]$$

$$N_{ez} = 11883,67 \text{ kN}$$

Logo, tem-se que  $N_e = 8506,78 \text{ kN}$ .

### Cálculo de $Q$ – Fator de redução total (anexo F)

$$Q = Q_s * Q_a$$

- Elementos comprimidos AL - Classificação Grupo 5 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{k_c}\right)}}$$

O coeficiente  $k_c$  é dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{\frac{562}{16}}} = 0,675$$

Pode-se observar que o coeficiente  $k_c$  atende a condição  $0,35 \leq k_c \leq 0,76$ , portando:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{\frac{250 * 10^6}{0,675}}} = 14,871$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{600/2}{19} = 15,789$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 15,789 > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 14,871$$

Logo, ocorre flambagem local na mesa, calcula-se  $Q_s$ .

Cálculo de  $Q_s$  - Fator de redução que leva em consideração a flambagem local (item F.2 (c)), Classificação Grupo 5 da Tabela F.1:

$$1,17 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{k_c}\right)}} = 1,17 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9}{\frac{250 \cdot 10^6}{0,675}}} = 27,187$$

Como  $14,871 < (b/t) = 15,789 < 27,187$ , tem-se:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}$$

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \left(\frac{600/2}{19}\right) \sqrt{\frac{250 \cdot 10^6}{0,675 \cdot 200 \cdot 10^9}}$$

$$Q_s = 0,973$$

- Elementos comprimidos AA - Classificação Grupo 2 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9}{250 \cdot 10^6}}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,14$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{562}{16} = 35,13$$

Como:

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 35,13 < \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,14$$

Logo, não ocorre flambagem local na alma e  $Q_a = 1$ .

Assim,

$$Q = 0,973 * 1,0$$

$$Q = 0,973$$

**Cálculo do índice de esbeltez reduzido –  $\lambda_0$  (item 5.3.3.2)**

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,973 * 317,9 * 10^4 * 250 * 10^6}{8506,78 * 10^3}}$$

$$\lambda_0 = 0,953$$

**Cálculo do fator de redução  $\chi$  (item 5.3.3)**

Como  $\lambda_0 = 0,953 < 1,5$  tem-se:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,953^2}$$

$$\chi = 0,684$$

Após ter calculado todos os fatores é possível encontrar a força axial resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{d1}} = \frac{0,684 * 0,973 * 317,9 * 10^4 * 250 * 10^6}{1,10}$$

$$N_{c,Rd} = 4808,46 \text{ kN}$$

Por meio da inserção dos dados de entrada da coluna na planilha, foi obtida a força axial de compressão resistente de cálculo apresentada na Figura 11.



Figura 11 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso um

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Força axial resistente de cálculo**

Para combinações: Normais

$\gamma_{a1} = 1,1$

OBS: Opcional, mudar conforme projeto.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Combinações	$\gamma_{a1}$
Normais	1,1
Especiais ou de construção	1,1
Excepcionais	1,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

**$N_{c,Rd} = 4806,18 \text{ kN}$**

Início

Fonte: Autoria própria.

### Análise dos resultados obtidos

Neste estudo de caso tem-se a condição onde ocorre flambagem local apenas da mesa do perfil. Observa-se uma diferença de 2,28 kN entre o resultado da análise teórica e o resultado obtido pela planilha. Essa diferença está relacionada ao arredondamento. Sendo assim, a similaridade entre os resultados obtidos valida a planilha elaborada.

#### 3.1.2 Segundo estudo de caso

O Segundo Estudo de Caso apresenta a resistência de cálculo à compressão de uma coluna de 4,0 m de comprimento, composta pelo perfil soldado CS 450x144, fabricado em aço MR250. As condições de apoio da coluna foram consideradas em relação ao eixo x, como engastada na base e rotulada no topo, e em relação ao eixo y, como engastada na base e livre no topo.

Resistência de cálculo à compressão por meio de análise teórica:

Propriedades do perfil:

- $A_g = 183,70 \text{ cm}^2$ ;
- $I_x = 73621 \text{ cm}^4$ ;
- $I_y = 24303 \text{ cm}^4$ ;
- $r_x = 20,02 \text{ cm}$ ;
- $r_y = 11,50 \text{ cm}$ ;
- $J = 135 \text{ cm}^4$ ;
- $C_w = 11442627 \text{ cm}^6$ ;
- $r_0 = 23,09 \text{ cm}$ .

Propriedades mecânicas do aço:

- $E = 200000 \text{ MPa}$ ;
- $G = 77000 \text{ MPa}$ ;
- $f_y = 250 \text{ MPa}$ .

Dimensões do Perfil:

- $b_f = 450 \text{ mm}$ ;
- $t_f = 16 \text{ mm}$ ;
- $d = 450 \text{ mm}$ ;
- $h = 418 \text{ mm}$ ;
- $t_w = 9,5 \text{ mm}$ .

Dados da coluna sem apoio intermediário:

- $K_x = 0,8$ ;
- $K_y = 2,1$ ;
- $K_z = 2,0$ .

Comprimento destravado:

- $L_x = 4,0 \text{ m}$ ;
- $L_y = 4,0 \text{ m}$ ;
- $L_z = 4,0 \text{ m}$ .

**Força axial resistente de cálculo (item 5.3.2)**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

**Limitação do índice de esbeltez (item 5.3.4)**

Verificando a condição de limite de esbeltez  $\leq 200$ .

$$\frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{0,8 * 4,0}{20,02 * 10^{-2}} = 15,984 \text{ OK!}$$

$$\frac{K_y L_y}{r_y} = \frac{2,1 * 4,0}{11,50 * 10^{-2}} = 73,043 \text{ OK!}$$

### Cálculo de $N_e$ – Força axial de flambagem elástica (anexo E)

- Flambagem por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 73621 * 10^{-8}}{(0,8 * 4,0)^2} = 141916,04 \text{ kN}$$

- Flambagem por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 24303 * 10^{-8}}{(2,1 * 4,0)^2} = 6798,78 \text{ kN}$$

- Flambagem por torção em relação ao eixo z:

$$N_{ez} = \frac{I}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right]$$

$$N_{ez} = \frac{I}{(23,09 * 10^{-2})^2} \left[ \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 11442627 * 10^{-12}}{(2 * 4,0)^2} + 77 * 10^9 * 135 * 10^{-8} \right]$$

$$N_{ez} = 8569,28 \text{ kN}$$

Logo, tem-se que  $N_e = 6798,78 \text{ kN}$ .

### Cálculo de $Q$ – Fator de redução total (anexo F)

$$Q = Q_s * Q_a$$

- Elementos comprimidos AL - Classificação Grupo 5 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{k_c}\right)}}$$

O coeficiente  $k_c$  é dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{\frac{418}{9,5}}} = 0,603$$

Pode-se observar que o coeficiente  $k_c$  atende a condição  $0,35 \leq k_c \leq 0,76$ , portanto:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{\frac{250 * 10^6}{0,603}}} = 14,057$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{450/2}{16} = 14,063$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 14,063 > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 14,057$$

Logo, ocorre flambagem local na mesa, calcula-se  $Q_s$ .

Cálculo de  $Q_s$  - Fator de redução que leva em consideração a flambagem local (item F.2 (c)), Classificação Grupo 5 da Tabela F.1:

$$1,17 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{k_c}\right)}} = 1,17 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{\frac{250 * 10^6}{0,603}}} = 25,698$$

Como  $14,057 < (b/t) = 14,063 < 25,698$ , tem-se:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}$$

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \left(\frac{450/2}{16}\right) \sqrt{\frac{250 * 10^6}{0,603 * 200 * 10^9}}$$

$$Q_s = 0,999$$

- Elementos comprimidos AA - Classificação Grupo 2 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,14$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{418}{9,5} = 44$$

Como:

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 44 > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,14$$

Logo, ocorre flambagem local na alma e calcula-se  $Q_a$ .

Cálculo de  $Q_a$  - Fator de redução que leva em consideração a flambagem local (itens F.3.1, e F.3.2):

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) t$$

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[ 1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]$$

$$b_{ef} = 1,92 * 9,5 * 10^{-3} \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}} \left[ 1 - \frac{0,34}{44} \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}} \right]$$

$$b_{ef} = 403,149 \leq 418 \text{ OK!}$$

$$A_{ef} = 183,7 * 10^{-4} - \sum (418 * 10^{-3} - 403,149 * 10^{-3}) 9,5 * 10^{-3} = 0,018$$

Portanto:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{0,018}{183,7 * 10^{-4}} = 0,992$$

Assim,

$$Q = Q_s * Q_a$$

$$Q = 0,999 * 0,992$$

$$Q = 0,991$$

### **Cálculo do índice de esbeltez reduzido – $\lambda_0$ (item 5.3.3.2)**

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,991 * 183,7 * 10^{-4} * 250 * 10^6}{6798,78 * 10^3}}$$

$$\lambda_0 = 0,818$$

### **Cálculo do fator de redução $\chi$ (item 5.3.3)**

Como  $\lambda_0 = 0,818 < 1,5$  tem-se:

$$\chi = 0,658 \lambda_0^2 = 0,658^{0,818^2}$$

$$\chi = 0,756$$

Após ter calculado todos os fatores é possível encontrar a força axial resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,756 \cdot 0,991 \cdot 183,7 \cdot 10^{-4} \cdot 250 \cdot 10^6}{1,10}$$

$$N_{c,Rd} = 3127,89 \text{ kN}$$

Por meio da inserção dos dados de entrada da coluna na planilha, foi obtida a força axial de compressão resistente de cálculo apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso dois

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Força axial resistente de cálculo**

Para combinações: Normais

$\gamma_{a1} = 1,1$

OBS: Opcional, mudar conforme projeto.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

**$N_{c,Rd} = 3126,81 \text{ kN}$**

Combinações	$\gamma_{a1}$
Normais	1,1
Especiais ou de construção	1,1
Excepcionais	1,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

Início

Fonte: Autoria própria.

### Análise dos resultados obtidos

Neste estudo de caso tem-se a condição onde ocorre flambagem local da mesa e da alma do perfil. Observa-se uma diferença de 1,08 kN entre o resultado da análise teórica e o resultado obtido pela planilha, essa diferença está relacionada ao arredondamento. Sendo assim, a similaridade entre os resultados obtidos valida a planilha elaborada.

#### 3.1.3 Terceiro estudo de caso

O Terceiro Estudo de Caso apresenta a resistência de cálculo à compressão de uma coluna de 5,0 m de comprimento, composta pelo perfil soldado CS 450x188, fabricado em aço

MR250. As condições de apoio da coluna foram consideradas em relação ao eixo x, como engastada na base e rotulada no topo, e em relação ao eixo y, como engastada na base e livre no topo.

Resistência de cálculo à compressão por meio de análise teórica:

Propriedades do perfil:

- $A_g = 240,1 \text{ cm}^2$ ;
- $I_x = 97865 \text{ cm}^4$ ;
- $I_y = 34023 \text{ cm}^4$ ;
- $r_x = 20,19 \text{ cm}$ ;
- $r_y = 11,9 \text{ cm}$ ;
- $J = 349 \text{ cm}^4$ ;
- $C_w = 15550692 \text{ cm}^6$ ;
- $r_0 = 23,44 \text{ cm}$ .

Propriedades mecânicas do aço:

- $E = 200000 \text{ MPa}$ ;
- $G = 77000 \text{ MPa}$ ;
- $f_y = 250 \text{ MPa}$ .

Dimensões do Perfil:

- $b_f = 450 \text{ mm}$ ;
- $t_f = 22,4 \text{ mm}$ ;
- $d = 450 \text{ mm}$ ;
- $h = 405 \text{ mm}$ ;
- $t_w = 9,5 \text{ mm}$ .

Dados da coluna sem apoio intermediário:

- $K_x = 0,8$ ;
- $K_y = 2,1$ ;
- $K_z = 2,0$ .

- Comprimento destravado:

- $L_x = 5,0 \text{ m}$ ;
- $L_y = 5,0 \text{ m}$ ;
- $L_z = 5,0 \text{ m}$ .

### **Força axial resistente de cálculo (item 5.3.2)**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{al}}$$

### **Limitação do índice de esbeltez (item 5.3.4)**

Verificando a condição de limite de esbeltez  $\leq 200$ .

$$\frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{0,8 * 5,0}{20,19 * 10^{-2}} = 19,812 \text{ OK!}$$



$$\frac{K_y L_y}{r_y} = \frac{2,1 * 5,0}{11,9 * 10^{-2}} = 88,235 \text{ OK!}$$

### Cálculo de $N_e$ – Força axial de flambagem elástica (anexo E)

- Flambagem por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 97865 * 10^{-8}}{(0,8 * 5,0)^2} = 120736,10 \text{ kN}$$

- Flambagem por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 34023 * 10^{-8}}{(2,1 * 5,0)^2} = 6091,49 \text{ kN}$$

- Flambagem por torção em relação ao eixo z:

$$N_{ez} = \frac{I}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right]$$

$$N_{ez} = \frac{I}{(23,44 * 10^{-2})^2} \left[ \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 15550692 * 10^{-12}}{(2 * 5,0)^2} + 77 * 10^9 * 349 * 10^{-8} \right]$$

$$N_{ez} = 10477,85 \text{ kN}$$

Logo, tem-se que  $N_e = 6091,49 \text{ kN}$ .

### Cálculo de $Q$ – Fator de redução total (anexo F)

$$Q = Q_s * Q_a$$

- Elementos comprimidos AL - Classificação Grupo 5 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{k_c}\right)}}$$

O coeficiente  $k_c$  é dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{\frac{405}{9,5}}} = 0,613$$

Pode-se observar que o coeficiente  $k_c$  atende a condição  $0,35 \leq k_c \leq 0,76$ , portanto:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{\frac{250 * 10^6}{0,613}}} = 14,168$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{450/2}{22,4} = 14,063$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 14,063 > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 10,045$$

Logo, não ocorre flambagem local na mesa, portanto  $Q_s = 1$ .

- Elementos comprimidos AA - Classificação Grupo 2 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,144$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{405}{9,5} = 42,631$$

Como:

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 42,631 > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,144$$

Logo, ocorre flambagem local na alma e calcula-se  $Q_a$ .

Cálculo de  $Q_a$  - Fator de redução que leva em consideração a flambagem local (itens F.3.1, e F.3.2):

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) t$$

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[ 1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right]$$

$$b_{ef} = 1,92 * 9,5 * 10^{-3} \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}} \left[ 1 - \frac{0,34}{42,63} \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}} \right]$$

$$b_{ef} = 399,53 \leq 418 \text{ Ok!}$$

$$A_{ef} = 240,10 * 10^{-4} - \sum (405 * 10^{-3} - 399,53 * 10^{-3}) 9,5 * 10^{-3} = 0,024$$

Portanto:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{0,024}{240,1 * 10^{-4}} = 0,998$$

Assim,

$$Q = Q_s * Q_a$$

$$Q = 1 * 0,998$$

$$Q = 0,998$$

**Cálculo do índice de esbeltez reduzido –  $\lambda_0$  (item 5.3.3.2)**

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,998 * 240,1 * 10^{-4} * 250 * 10^6}{6091,49 * 10^3}}$$

$$\lambda_0 = 0,991$$

**Cálculo do fator de redução  $\chi$  (item 5.3.3)**

Como  $\lambda_0 = 0,991 < 1,5$  tem-se:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,991^2}$$

$$\chi = 0,663$$

Após ter calculado todos os fatores é possível encontrar a força axial resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,663 * 0,998 * 240,10 * 10^{-4} * 250 * 10^6}{1,10}$$

$$N_{c,Rd} = 3609,13 \text{ kN}$$

Por meio da inserção dos dados de entrada da coluna na planilha, foi obtida a força axial de compressão resistente de cálculo apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso três

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Força axial resistente de cálculo**

Para combinações: Normais

$\gamma_{a1} = 1,1$

OBS: Opcional, mudar conforme projeto.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Combinações	$\gamma_{a1}$
Normais	1,1
Especiais ou de construção	1,1
Excepcionais	1,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

**$N_{c,Rd} = 3608,01 \text{ kN}$**

Início

Fonte: Autoria própria.

### Análise dos resultados obtidos

Neste estudo de caso tem-se a condição onde ocorre flambagem local apenas da alma do perfil. Observa-se uma diferença de 1,12 kN entre o resultado da análise teórica e o resultado obtido pela planilha, essa diferença está relacionada ao arredondamento. Sendo assim, a similaridade entre os resultados obtidos valida a planilha elaborada.

#### 3.1.4 Quarto estudo de caso

O Quarto Estudo de Caso apresenta a resistência de cálculo à compressão de uma coluna de 4,0 m de comprimento, composta pelo perfil soldado CVS 500x220, fabricado em aço MR250. As condições de apoio da coluna foram consideradas em relação ao eixo x, como engastada na base e rotulada no topo, e em relação ao eixo y, como engastada na base e livre no topo.

Resistência de cálculo à compressão por meio de análise teórica:

Propriedades do perfil:

- $A_g = 280 \text{ cm}^2$ ;
- $I_x = 154583 \text{ cm}^4$ ;
- $I_y = 26684 \text{ cm}^4$ ;
- $r_x = 23,5 \text{ cm}$ ;
- $r_y = 9,76 \text{ cm}$ ;
- $J = 488,3 \text{ cm}^4$ ;
- $C_w = 18375000 \text{ cm}^6$ ;
- $r_0 = 25,45 \text{ cm}$ .

Propriedades mecânicas do aço:

- $E = 200000 \text{ MPa}$ ;
- $G = 77000 \text{ MPa}$ ;
- $f_y = 250 \text{ MPa}$ .

Dimensões do Perfil:

- $b_f = 500 \text{ mm}$ ;
- $t_f = 19 \text{ mm}$ ;
- $d = 500 \text{ mm}$ ;
- $h = 462 \text{ mm}$ ;
- $t_w = 16 \text{ mm}$ .

Dados da coluna sem apoio intermediário:

- $K_x = 0,8$ ;
- $K_y = 2,1$ ;
- $K_z = 2,0$ .

Comprimento destravado:

- $L_x = 4,0 \text{ m}$ ;
- $L_y = 4,0 \text{ m}$ ;
- $L_z = 4,0 \text{ m}$ .

**Força axial resistente de cálculo (item 5.3.2)**

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

**Limitação do índice de esbeltez (item 5.3.4)**

Verificando a condição de limite de esbeltez  $\leq 200$ .

$$\frac{K_x L_x}{r_x} = \frac{0,8 * 4,0}{23,5 * 10^{-2}} = 13,617 \text{ OK!}$$

$$\frac{K_y L_y}{r_y} = \frac{2,1 * 4,0}{9,76 * 10^{-2}} = 86,066 \text{ OK!}$$

### Cálculo de $N_e$ – Força axial de flambagem elástica (anexo E)

- Flambagem por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 154583 * 10^{-8}}{(0,8 * 4,0)^2} = 297983,02 \text{ kN}$$

- Flambagem por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 26684 * 10^{-8}}{(2,1 * 4,0)^2} = 7464,87 \text{ kN}$$

- Flambagem por torção em relação ao eixo z:

$$N_{ez} = \frac{I}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{ez} = \frac{I}{(25,45 * 10^{-2})^2} \left[ \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 18375000 * 10^{-12}}{(2 * 4,0)^2} + 77 * 10^9 * 488,3 * 10^{-8} \right]$$

$$N_{ez} = 14554,86 \text{ kN}$$

Logo, tem-se que  $N_e = 7464,87 \text{ kN}$ .

### Cálculo de $Q$ – Fator de redução total (anexo F)

$$Q = Q_s * Q_a$$

- Elementos comprimidos AL - Classificação Grupo 5 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{\left(\frac{f_y}{k_c}\right)}}$$

O coeficiente  $k_c$  é dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{\frac{462}{16}}} = 0,744$$

Pode-se observar que o coeficiente  $k_c$  atende a condição  $0,35 \leq k_c \leq 0,76$ , portanto:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{\frac{250 * 10^6}{0,744}}} = 15,614$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{500/2}{19} = 15,158$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 15,158 < \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 15,614$$

Logo, não ocorre flambagem local na mesa, portanto  $Q_s = 1$ .

- Elementos comprimidos AA - Classificação Grupo 2 da Tabela F.1:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200 * 10^9}{250 * 10^6}}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,14$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{462}{16} = 28,875$$

Como:

$$\left(\frac{b}{t}\right) = 28,875 < \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 42,14$$



Logo, não ocorre flambagem local na alma e  $Q_a = 1$ .

Assim,

$$Q = Q_s * Q_a$$

$$Q = 1,0 * 1,0$$

$$Q = 1,0$$

### Cálculo do índice de esbeltez reduzido – $\lambda_0$ (item 5.3.3.2)

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1,0 * 280 * 10^{-4} * 250 * 10^6}{7464,87 * 10^3}}$$

$$\lambda_0 = 0,968$$

### Cálculo do fator de redução $\chi$ (item 5.3.3)

Como  $\lambda_0 = 0,968 > 1,5$  tem-se:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,968^2}$$

$$\chi = 0,676$$

Após ter calculado todos os fatores é possível encontrar a força axial resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{al}} = \frac{0,676 * 1,0 * 280 * 10^{-4} * 250 * 10^6}{1,10}$$

$$N_{c,Rd} = 4301,82 \text{ kN}$$

Por meio da inserção dos dados de entrada da coluna na planilha, foi obtida a força axial de compressão resistente de cálculo apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Força axial resistente de cálculo – Estudo de caso quatro

**PPLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Força axial resistente de cálculo**

Para combinações: Normais

$\gamma_{a1} = 1,1$

OBS: Opcional, mudar conforme projeto.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Combinações	$\gamma_{a1}$
Normais	1,1
Especiais ou de construção	1,1
Excepcionais	1,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

$N_{c,Rd} = 4297,85 \text{ kN}$

Início

Fonte: Autoria própria.

### Análise dos resultados obtidos

Neste estudo de caso tem-se a condição onde não ocorre flambagem local na mesa e nem na alma do perfil. Observa-se uma diferença de 3,97 kN entre o resultado da análise teórica e o resultado obtido pela planilha, essa diferença está relacionada ao arredondamento. Sendo assim, a similaridade entre os resultados obtidos valida a planilha elaborada.

#### **4. CONCLUSÃO**

Durante o trabalho foi apresentado o dimensionamento por meio de análise teórica e notou-se uma grande variedade de equações para o cálculo da resistência de perfis soldados, em aço estrutural com seções I ou H submetidas à força axial de compressão, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008. O objetivo da elaboração da planilha por meio do *software* Excel foi atendido, validada mediante estudos de caso no item 3.2. A planilha realiza o dimensionamento com grande precisão de forma rápida, prática e didática, auxiliando o usuário na escolha do perfil de aço que melhor atenda às suas necessidades de projeto.

Vale salientar que, como a planilha realiza todos os cálculos e verificações de forma automática, o usuário é responsável pela inserção correta dos dados de entrada e utilização adequada da planilha, respeitando-se as recomendações descritas no presente trabalho. A má utilização pode ocasionar resultados não confiáveis. Como proposições para trabalhos futuros, pode-se incluir novos tipos de perfis.

## **5. REFERÊNCIAS**

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

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

PORTAL METÁLICA – Portal metálica construção civil. Disponível em:  
<<http://www.metalica.com.br>>. Acesso em: 04 março. 2021.

FAM – Construções metálicas pesadas. Disponível em: < <https://www.famsteel.com.br/>>. Acesso em: 05 fevereiro. 2021.

## ANEXO I

Em anexo consta todas as abas da planilha do Excel com suas respectivas funcionalidades.

Figura 1 –Aba 1: Dados de Entrada

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Propriedades do Perfil**

$A_g =$   cm<sup>2</sup>

$I_x =$   cm<sup>4</sup>

$I_y =$   cm<sup>4</sup>

$r_x =$   cm

$r_y =$   cm

$J =$   cm<sup>4</sup>

$C_w =$   cm<sup>6</sup>

**Propriedades mecânicas do aço (MPa)**

$E =$

$G =$

$f_y =$

**Dimensões do Perfil (mm)**

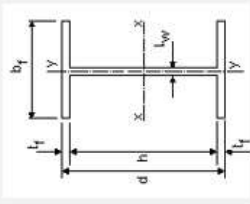
$b_f =$

$t_f =$

$d =$

$h =$

$t_w =$



Fonte: Portal Metálica: 2019.

**Dados da Coluna sem Apoios Intermediários**

Valores técnicos de $K_x$ ou $K_y$	
0,5	0,7 1,0 1,0 2,0 2,0
0,65	0,80 1,2 1,0 2,1 2,0

Valores recomendados

$K_x =$

$K_y =$

$K_z =$

**Comprimento destravado (m)**

$L_x =$

$L_y =$

$L_z =$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

**1.** Força axial resistente de cálculo

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

**1.1.** Limite do índice de esbeltez

**1.2.** Cálculo de  $N_e$

**1.3.** Cálculo de  $Q$

1.3.1. Cálculo de  $Q_s$

1.3.2. Cálculo de  $Q_a$

**1.4.** Cálculo do índice de esbeltez reduzido,  $\lambda_0$

**1.5.** Fator de redução  $\chi$

OBS: Destaca-se a importância da leitura do trabalho escrito afim de garantir a eficácia quanto aos dados inseridos.

Fonte: Autoria própria.

Figura 2 – Aba 2: 1. Força resistente de cálculo

**PPLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

---

**Força axial resistente de cálculo**

Para combinações: Normais

$$\gamma_{a1} = 1,1$$

OBS: Opicional, mudar conforme projeto.

Combinações	$\gamma_{a1}$
Normais	1,1
Especiais ou de construção	1,1
Excepcionais	1,0

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$N_{c,Rd} = \#DIV/0! \text{ kN}$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

Fonte: Autoria própria.

Figura 3 –Aba 3: 1.1 Limitação do Índice de Esbeltez

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

---

**Limitação do índice de esbeltez**

Verificação: O índice de esbeltez das barras comprimidas não deve ser superior a 200.

$$\frac{K_x L_x}{r_x} =$$

#DIV/0!

$$\frac{K_y L_y}{r_y} =$$

#DIV/0!

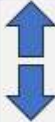
[Início](#)

Fonte: Autoria própria.

Figura 4 –Aba 4: 1.2 Cálculo de  $N_e$

PPLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008

Cálculo de  $N_e$  - Força axial de flambagem elástica



<p>Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal:</p>	$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} =$	<p>#DIV/0!    kN</p>
<p>Flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal:</p>	$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} =$	<p>#DIV/0!    kN</p>
<p>Flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:</p>	$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right]$	<p>#DIV/0!    kN</p>

$N_e = \#DIV/0! \text{ kN}$

Fonte: Autoria própria.

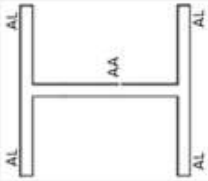


Figura 5 – Aba 5: 1.3 Cálculo do  $Q$

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Cálculo do  $Q$  - Fator de redução total associado à flambagem local**

$Q_s$  e  $Q_a$  são fatores de redução que levam em conta a flambagem local dos elementos AL e AA, respectivamente.



Elementos AA - duas bordas longitudinais vinculadas;  
Elementos AL - apenas uma borda longitudinal vinculada.

Fator de redução total:

$$Q = Q_s \cdot Q_a$$

$Q = \#DIV/0!$

Início

Fonte: Autoria própria.

Figura 6 –Aba 6: 1.3.1 Cálculo de  $Q_s$

PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008			
Cálculo de $Q_x$ Fator de redução que leva em consideração a flambagem local dos elementos AL			
Elementos Comprimitos AL - Grupo 5: $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}} = \#DIV/0!$ $k_c = \frac{4}{h} \sqrt{t_w} = \#DIV/0!$ Condição: $0,35 \leq K_c \leq 0,76$	Relação entre largura e espessura: $\left(\frac{b}{t}\right) = \#DIV/0!$ Para a condição abaixo: $\left(\frac{b}{t}\right) \#DIV/0! \left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ $\#DIV/0!$	Cálculo de $Q_s$ (considere quando ocorrer flambagem local) $1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}} = \#DIV/0!$ $Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} = \#DIV/0!$ Para o intervalo abaixo: $0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}} < \left(\frac{b}{t}\right) \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}}$	$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} = \#DIV/0!$ Para a condição abaixo: $\left(\frac{b}{t}\right) > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y k_c}}$ Potanto: $Q_s = \#DIV/0!$

Fonte: Autoria própria.

Figura 7 –Aba 7: 1.3.2 Cálculo de  $Q_a$

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

---

**Cálculo de  $Q_a$  - Fator de redução que leva em consideração a flambagem local**

<p><b>Elementos Comprimidos AA - Grupo 2:</b></p> $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \#DIV/0!$	<p><b>Relação entre largura e espessura:</b></p> $\left(\frac{b}{t}\right) = \#DIV/0!$ <p>Para a condição abaixo:</p> $\left(\frac{b}{t}\right) \#DIV/0! < \left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ <p style="text-align: right;">#DIV/0!</p>	<p><b>Cálculo de <math>Q_a</math> (considere quando ocorrer flambagem local)</b></p> $A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) t = \#DIV/0!$ $b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[ 1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] = \#DIV/0! \leq 0$ $Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \#DIV/0!$ <p style="border: 1px dashed red; padding: 2px; display: inline-block;">Portanto, <math>Q_a = \#DIV/0!</math></p>
---	--	---

Início

Fonte: Autoria própria.

Figura 8 –Aba 8: 1.4 Índice de esbeltez reduzido


**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

**Cálculo do índice de esbeltez reduzido -  $\lambda_0$**

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}}$$

$\lambda_0 =$  #DIV/0!

[Início](#)



Fonte: Autoria própria.

Figura 9 –Aba 9: 1.5 Fator de redução  $\chi$

**PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SEM APOIOS INTERMEDIÁRIOS, COMPOSTAS POR PERFIS SOLDADOS I OU H EM AÇO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO DE ACORDO COM ABNT NBR 8800:2008**

---

**Fator de redução  $\chi$**

**Para a condição abaixo:**

$\lambda_0 \leq 1,5$

Têm-se:

$$\chi = 0,658 \lambda_0^3 = \text{\#DIV/0!}$$

**Para a condição abaixo:**

$\lambda_0 > 1,5$

Têm-se:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \text{\#DIV/0!}$$

Portanto:  $\chi = \text{\#DIV/0!}$

[Início](#)

Fonte: Autoria própria.