

ESTUDO COMPARATIVO DAS NORMAS NBR8800:86 E NBR8800:08 PARA O CÁLCULO DE ESFORÇOS RESISTENTES DE PERFIS SOLDADOS E LAMINADOS

José Ricardo Queiroz Franco^a, Alexandre Caram e Silva^b

^aPh.D., CADTEC - Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia - Bloco 1 - 4o andar, sala 4215, Pampulha, Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901, Brazil, franco@dees.ufmg.br, <http://www.cadtec.dees.ufmg.br>

^bM.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais/Acon Engenharia, Rua Desembargador Jorge Fontana, 80, sala 209, Belvedere, Belo Horizonte/MG CEP 30320-670, Brazil, alexandre@aconengenharia.com.br, <http://www.acconengenharia.com.br>

Palavras Chave: Esforços resistentes, perfis laminados, norma NBR8800.

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre as normas NBR8800 de 1986 e sua última revisão da NBR8800 de 2008 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Esse estudo compara as equações apresentadas nessas normas para verificação dos esforços resistentes de perfis "I" laminados. A verificação estrutural feita se aplica perfeitamente a um modelo de estrutura em pórtico espacial onde são comumente encontradas cargas de compressão, de flexão e cortante em torno dos eixos de maior e menor inércia. Um aplicativo CAE (Computer Aided Design) foi construído dentro de sistema computacional CAD/CAE mais genérico, que permite a automação das etapas de análise, dimensionamento e detalhamento. O aplicativo executa o processamento automatizado das equações de dimensionamento da norma NR8800 de 1986 e de sua revisão de 2008. O sistema foi desenvolvido utilizando o paradigma de POO e possui uma interface amigável com o usuário, para automatizar a coleta de dados da análise estrutural e executar o dimensionamento dos perfis segundo ambas as revisões da norma NBR8800. A generalidade do sistema permite também a automação das fases de dimensionamento e detalhamento do processo, através das tecnologias CAD/CAE, para o qual foram criadas bibliotecas de classes dinâmicas na forma de Plug-Ins do AutoCAD. O aplicativo CAE foi desenvolvido usando o ambiente de programação do Borland Delphi em Pascal. A interface entre os sistemas CAE e CAD foram programadas na linguagem C++, através da API (Application Program Interface) denominada ObjectARX (Autocad Runtime eXtension). As fases do processo são integradas com parâmetros passados através de arquivos texto no formato ASCII, de forma a garantir a concepção de um projeto de estrutura metálica seguro e confiável.

Além da verificação dos esforços resistentes de perfis conforme ambas as versões da NBR8800, o sistema desenvolvido faz também o dimensionamento e detalhamento de ligações rígidas viga-coluna. Para o estudo comparativo proposto neste trabalho será utilizado apenas o aplicativo CAE, embora o sistema seja composto também de uma ferramenta CAD integrada conforme anteriormente descrito.

1. INTRODUÇÃO

Na atualização e revisão da norma técnica de dimensionamento de estruturas metálicas ocorrida em 2008, algumas equações e procedimentos de verificação da resistência de perfis metálicos passaram por modificações. Estas alterações implicaram em conseqüências práticas no dia-a-dia dos escritórios de engenharia.

A despeito dos novos procedimentos a serem adotados na modelagem das estruturas, cujo novo conceito foi agora introduzido, algumas das equações existentes passaram por modificações, sendo elas, em alguns casos superficiais e em outros mais significativos. Estas modificações nas formulações matemáticas produziram valores de resistência diferentes quando um mesmo perfil verificado pela NBR8800:86 e pela NBR8800:08.

Este trabalho apresenta os principais pontos de mudança da norma e analisa de forma prática o que representará esta mudança.

2. O PROBLEMA MODELO

Para o estudo comparativo das revisões da norma serão estudados os resultados apresentados no dimensionamento de perfis comerciais de algumas bitolas e vãos diferentes, verificando-se os resultados de resistência obtidos no cálculo da tração, compressão, momentos fletores e cortantes para estas seções.

Os perfis adotados são do tipo "I" laminado do padrão Gerdau-Açominas por serem os mais amplamente empregados nas construções metálicas.

3. SISTEMA COMPUTACIONAL CAD/CAE

Para automação do processo de cálculo estrutural da resistência dos perfis foi desenvolvido um aplicativo CAE com uma interface simples e intuitiva aos engenheiros de estruturas, para tornar o uso do aplicativo fácil e rotineiro. O sistema foi desenvolvido utilizando o paradigma de POO e a interface amigável com o usuário permite automatizar a coleta de dados da análise estrutural e executar o dimensionamento dos perfis segundo ambas as revisões da norma NBR8800. Através da interface do programa são coletados os dados essenciais à análise estrutural dos elementos, tais como materiais utilizados, geometria básica da seção transversal, comprimentos dos vãos, etc... Os dados podem ser inseridos manualmente, através de caixas de diálogo, ou coletados automaticamente através da leitura e importação de um arquivo texto.

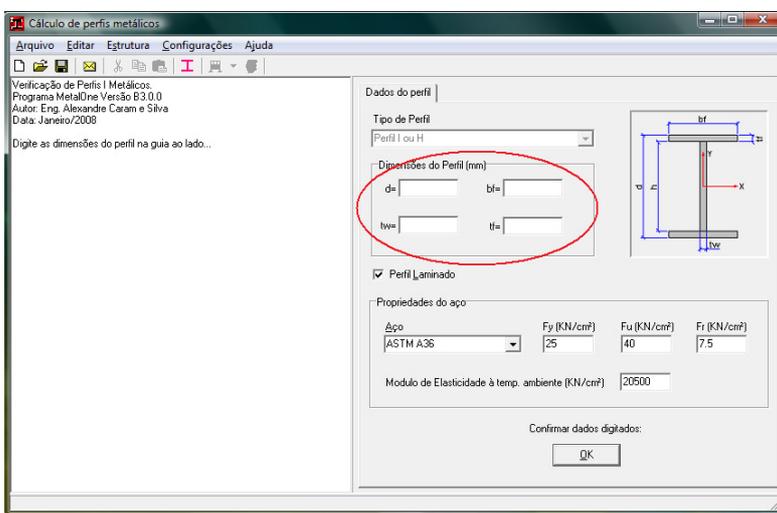


Figura 1 – Interface de coleta de dados do perfil

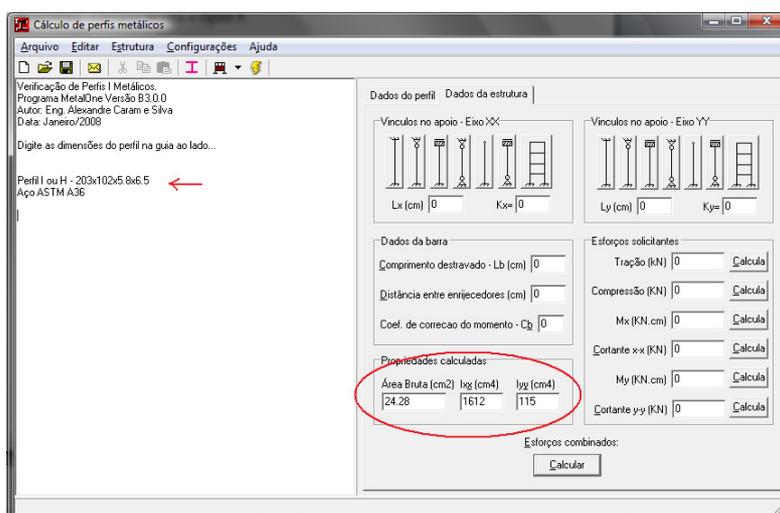


Figura 2 – Interface de coleta de dados da estrutura

O aplicativo CAE foi desenvolvido usando o ambiente de programação do Borland Delphi em Pascal. A interface de coleta de dados se subdivide em duas seções. Uma delas realiza a coleta de dados das dimensões básicas do perfil e do aço que o compõe, conforme visto na figura 1. A segunda aba, apresentada na figura 2, apresenta de forma automática as principais propriedades calculadas para as dimensões informadas na primeira e faz a coleta de dados da estrutura propriamente dita.

O aplicativo CAE foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Pascal através da interface gráfica de desenvolvimento da Borland denominada Delphi 7. Os principais procedimentos que governam o comportamento dos componentes visuais do programa estão listados abaixo na figura 3, e as funções específicas com as equações de dimensionamento criadas estão relacionadas na figura 4.

<<enumeration>> Procedimentos	<<enumeration>> Procedimentos (Continua)
+BarraAtualClick() +BotaoCalcLigClick() +BotaoCalculaCompresaoClick() +BotaoCalculaCombinacaoClick() +BotaoCalculaCortante() +BotaoCalculaMxClick() +BotaoCalculaMyClick() +BotaoCalculaTracaoClick() +BotaoCalculaTodosClick() +ButtonPerfilOkClick() +FileNewExecute() +CalculaKx() +CalculaKy() +CargaCompressaoExit() +Combinacao1Click() +Compressao1Click() +Cortante1Click() +e1Exit() +e2Exit()	+EmitirAvisos1Click() +FileExit1Execute() +FileOpen1Execute() +FileSave1Execute() +FileSaveAs1Execute() +FileSend1Execute() +FlexaoXX1Click() +FlexaoYY1Click() +FtdExit() +HelpAbout1Execute() +ligClick() +LimiteFuChange() +MenuPerfilClick() +MenuDimensionaClick() +Memoriadecalculo1Click() +NPPExit() +NumKeyPress() +PropriedadesDoAco1Click() +TipoAcoClick() +Tracao1Click()

Figura 3 – Procedimentos criados no aplicativo

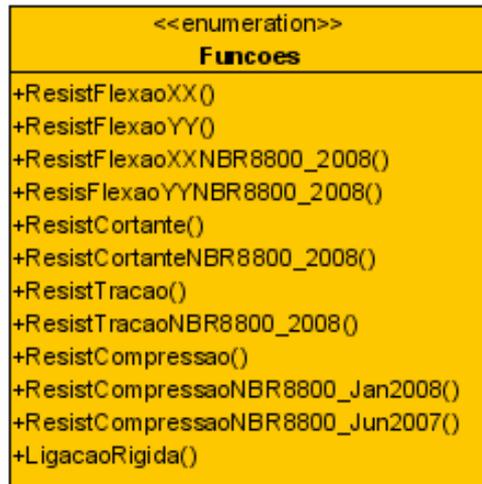


Figura 4 – Funções de dimensionamento criadas

Uma forma de comunicação entre o aplicativo de dimensionamento e a etapa de análise é através de uma interface para importação de dados por meio da leitura de um arquivo texto gerado por um aplicativo externo. Esse arquivo texto pode também ser gerado pelo usuário, utilizando um editor de texto qualquer. Uma amostra de um arquivo de dados lido pelo aplicativo pode ser visto na figura 5.

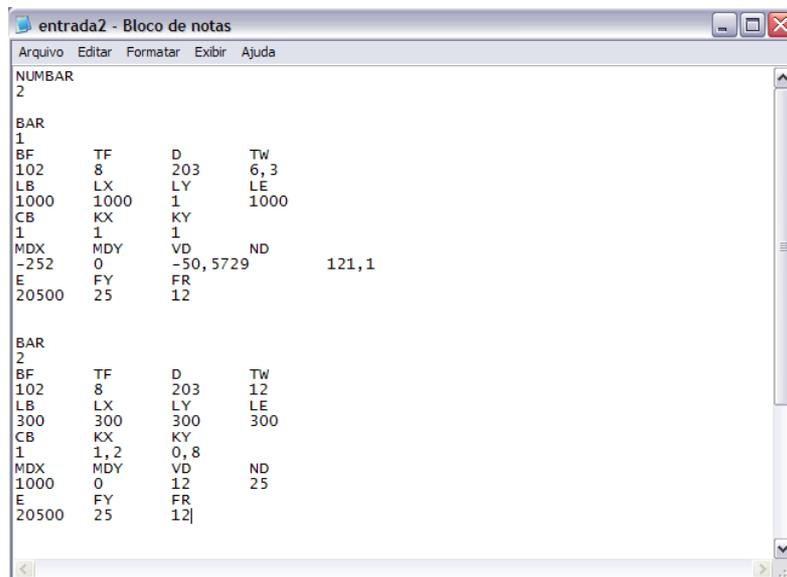


Figura 5 – Arquivo de entrada de dados automatizada.

Embora não seja objeto desse trabalho a generalidade do sistema permite também a automação das fases de dimensionamento e detalhamento do processo, através das tecnologias CAD/CAE. Para tal foram criadas bibliotecas de classes dinâmicas na forma de Plug-Ins do AutoCAD. A interface entre os sistemas CAE e CAD foram programadas na linguagem C++, através da API (Application Program Interface) denominada ObjectARX (Autocad Runtime eXtension). As fases do processo são integradas com parâmetros passados através de arquivos texto no formato ASCII, de forma a garantir a concepção de um projeto de estrutura metálica seguro e confiável.

4. PROPIEDADES FUNDAMENTAIS PARA DIMENSIONAMENTO DE PERFIS

As propriedades geométricas dos perfis "I" são calculadas tomando-se por base dimensões comerciais básicas fornecidas pelos fabricantes, conforme ilustrado na figura 6 abaixo.

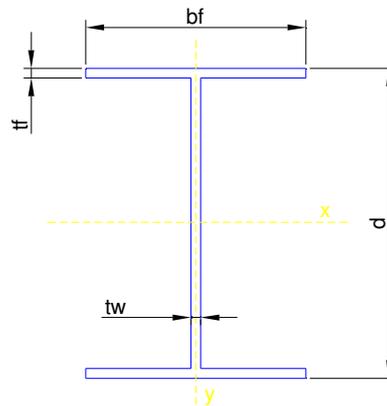


Figura 6 – Dimensões básicas do perfil I.

4.1 Módulo de elasticidade do aço

O módulo de elasticidade do aço E que na NBR8800:86 era tomado como 205000 MPa, passa a ter o seu valor de cálculo alterado para 200000 MPa na revisão da norma.

4.2 Área bruta do perfil

A área bruta do perfil "I" é determinada por:

$$A_g = 2 \cdot b_f \cdot t_f + t_w \cdot (d - 2 \cdot t_f) \quad (1)$$

4.3 Momentos principais de Inércia

Os momentos de inércia em relação aos eixos X e Y são dados respectivamente por:

$$I_{xx} = 2 \cdot \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot (d/2 - t_f/2)^2 + \frac{t_w \cdot (d - 2 \cdot t_f)^3}{12} \quad (2)$$

$$I_{yy} = 2 \cdot \frac{t_f \cdot b_f^3}{12} + \frac{(d - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^3}{12} \quad (3)$$

4.4 Raio de giração

Os Raios de giração r_x e r_y em relação aos eixos principais de inércia são definidos respectivamente a seguir:

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{xx}}{A_g}} \quad (4) \quad ; \quad r_y = \sqrt{\frac{I_{yy}}{A_g}} \quad (5)$$

4.5 Módulo de resistência elástico

Os módulos de resistência elástico W_x e W_y são:

$$W_x = \frac{2 \cdot I_{xx}}{d} \quad (6) \quad ; \quad W_y = \frac{2 \cdot I_{yy}}{b_f} \quad (7)$$

4.6 Constante de torção

A constante de torção J para um perfil I é:

$$J = \frac{2 \cdot b_f \cdot t_f^3}{3} + \frac{(d - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^3}{3} \quad (8)$$

4.7 Módulo de resistência plástico

Da mesma forma Z_x e Z_y são definidos como:

$$Z_x = t_f \cdot b_f \cdot (d - t_f) + \frac{(d - 2 \cdot t_f)^2 \cdot t_w}{4} \quad (9)$$

$$Z_y = \frac{t_f \cdot b_f^2}{2} + \frac{(d - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^2}{4} \quad (10)$$

4.8 Constante de empenamento da seção transversal

A constante de empenamento C_w é dada por:

$$C_w = \frac{I_{yy} \cdot (d - t_f)^2}{4} \quad (11)$$

5. EQUAÇÕES BÁSICAS DE DIMENSIONAMENTO SEGUNDO NBR8800

A seguir é apresentado as principais equações de verificação e dimensionamento da resistência de perfis "I" segundo a última revisão da norma NBR8800, explicando-se de forma sucinta as principais diferenças em relação à sua versão anterior de 1986.

5.1 Dimensionamento à tração

De uma maneira geral o índice de esbeltez no dimensionamento à tração deve ser em ambas as versões da norma inferior a 300. Assim,

$$\lambda_x = \frac{l_x}{r_x} \leq 300 \quad (12) \quad ; \quad \lambda_y = \frac{l_y}{r_y} \leq 300 \quad ; \text{ onde:} \quad (13)$$

l_x = comprimento destravado em relação ao eixo X

l_y = comprimento destravado em relação ao eixo Y

a) A equação para o calculo da força escoamento da seção bruta é:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (14)$$

onde:

$\gamma_{a1} = 1,1$ em condições normais de uso (Tabela 3 NBR8800:08) e,

f_u = Tensão de ruptura do aço e A_e = área líquida reduzida calculada por:

Nota-se aqui a primeira diferença de equações introduzida na nova revisão. Enquanto sua versão anterior aplicava um multiplicador de 0,9 para redução na resistência, a nova revisão faz uma divisão pelo coeficiente de 1,1 conforme apresentado.

b) A equação para determinar a força de ruptura da área líquida é:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (15)$$

onde:

$\gamma_{a2} = 1,35$ em condições normais de uso (Tabela 3 NBR8800),

f_u = Tensão de ruptura do aço e,

$$A_e = C_t \cdot A_n \quad (16)$$

onde:

A_n = Área líquida da Barra

C_t = Coeficiente de redução da área líquida da barra.

Da mesma forma nota-se aqui a substituição do fator de redução de 0,75 pelo coeficiente $\gamma_{a2} = 1,35$, que agora entra no denominador da equação.

5.2 Dimensionamento à compressão

As duas versões da NBR8800 são idênticas quanto à limitação do índice de esbeltez das barras comprimidas como sendo:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot l_x}{r_x} \leq 200 \quad (17) \quad ; \quad \lambda_y = \frac{k_y \cdot l_y}{r_y} \leq 200 \quad (18)$$

A força axial de compressão resistente de cálculo de uma barra, associada aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, continua obedecendo a mesma equação de dimensionamento, exceto pelo novo coeficiente $\gamma_{a1} = 1,1$ conforme anteriormente descrito. Assim,

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (19)$$

onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão,
 Q é o fator de redução total associado à flambagem local.

5.2.1 Fator de redução associado à resistência à compressão

Em relação à curva de flambagem é onde se observa uma grande mudança conceitual na nova NBR8800. Enquanto em sua revisão de 1986 eram propostas as quatro curvas apresentadas na Figura 7, na publicação de 2008 foi introduzido o conceito de uma curva única de flambagem na compressão, mostrada na Figura 8, facilitando consideravelmente os cálculos. A prescrição norte-americana válida atualmente para considerar as imperfeições iniciais, tensões residuais na avaliação da flambagem é o AISC 2005 (American Institute of Steel Construction (AISC), 2005), que também define uma única curva, que relaciona a esbeltez da peça e o coeficiente de redução da tensão de escoamento. Tal curva é baseada na curva do SSRC (Structural Stability Research Council).

Na NBR8800:08 o cálculo do fator de redução χ é dado por:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (20)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (21)$$

Onde o índice de esbeltez λ_0 é dado por,

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (22)$$

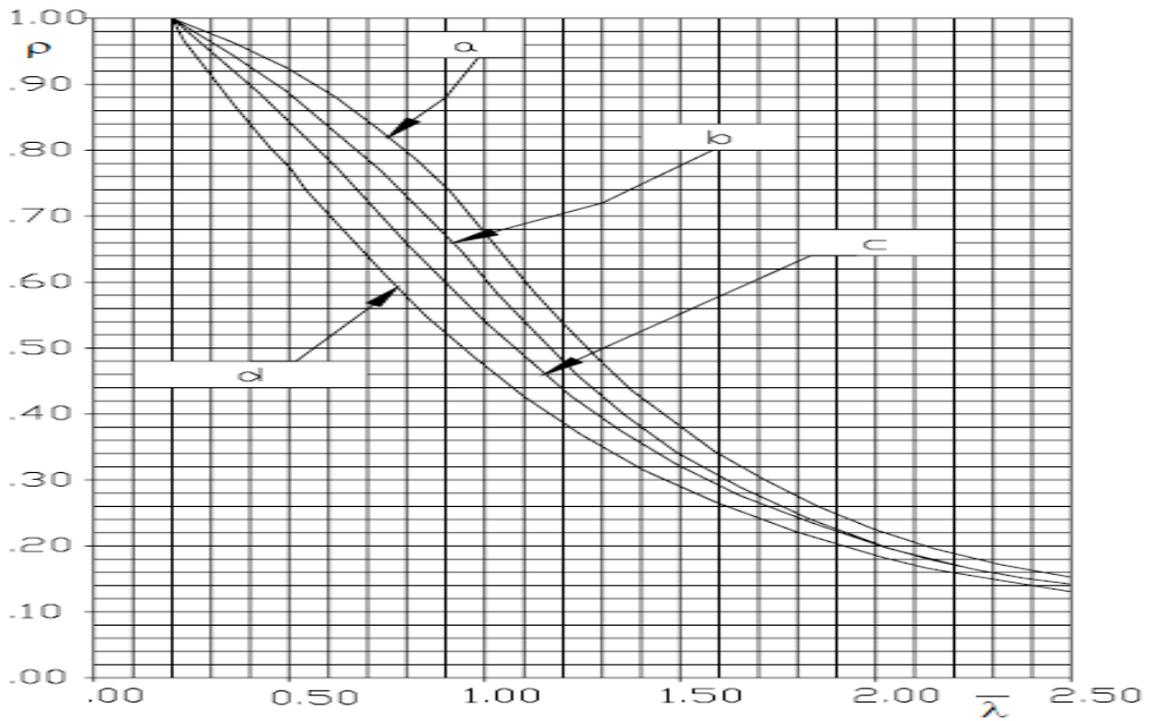


Figura 7 – Curvas de flambagem da NBR8800:86

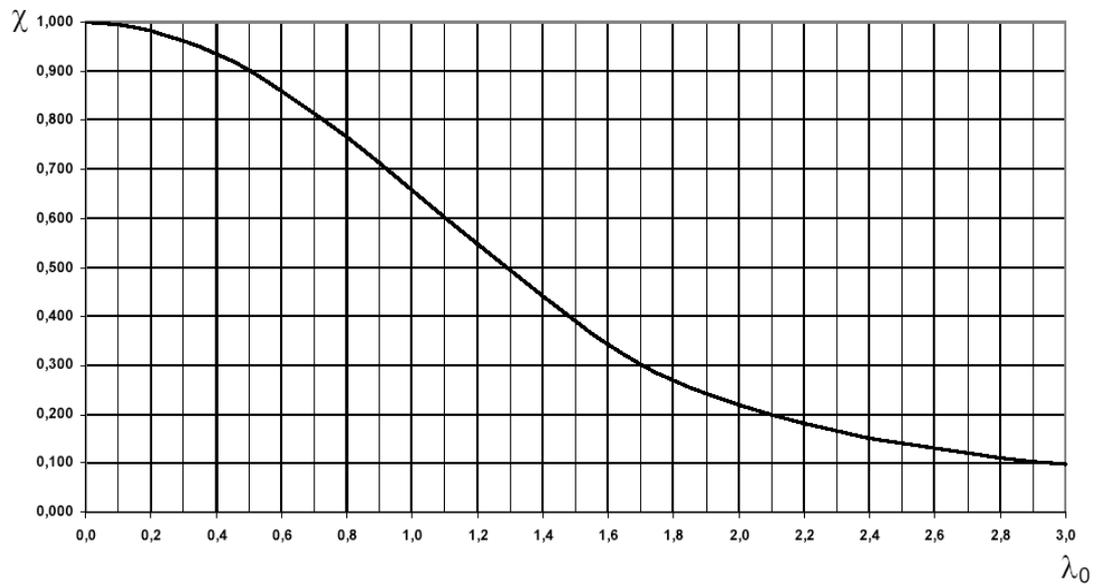


Figura 8 – Valores de χ em função do índice de esbeltez λ_0 da NBR8800:08

A força axial de flambagem elástica N_e depende do eixo considerado e é dada em ambas as versões da norma pelas equações que se seguem:

a) para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x-x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (23)$$

b) para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y-y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (24)$$

c) para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right] \quad (25)$$

onde $K_x L_x$ e $K_y L_y$ são comprimentos de flambagem conforme Tabela 1.

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

Tabela 1 – Coeficientes de flambagem.

Nos elementos contraventados, o coeficiente de flambagem por flexão deve ser tomado igual a 1,0, a menos que se demonstre que pode ser utilizado um valor menor.

5.2.2 Cálculo do fator de redução associado à flambagem local - Q

O cálculo do fator de redução total associado à flambagem local não sofreu mudanças e é dado pelo produto entre os fatores de redução devido à flambagem dos elementos que compõem a seção transversal. Os elementos podem ser do tipo AA (Apoiado-Apoiado), cujo fator de redução associado à flambagem será denominada de Q_a ou AL (Apoiado-Livre) cujo fator de redução será denominado Q_s , conforme ilustra a figura 9 abaixo.

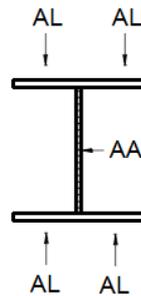


Figura 9 – Elementos AA e AL

O cálculo do fator de redução associado à flambagem local Q requer o cálculo de Q_a para os elementos AA da seção e de Q_s para os elementos AL.

$$Q = Q_a \cdot Q_s \quad (26)$$

a) No cálculo de Q_a , além da pequena flexibilização no limite para $Q_a = 1$ que era $1,47 \cdot \sqrt{E/f_y}$, a grande mudança faz-se agora pela maior facilidade de se obter a largura efetiva b_{ef} de forma direta para perfis que estão acima desta condição. Assim, para perfis I passa-se a ter:

$$Q_a = 1, \text{ para } \frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} \leq 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (27.1)$$

$$Q_a = \frac{A_g - (b - b_{ef}) \cdot t_w}{A_g}, \text{ para } \frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} > 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (27.2)$$

onde:

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t_w \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left[1 - \frac{c_a}{(d - 2 \cdot t_f)/t_w} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \quad (28)$$

com:

$$c_a = 0,34$$

b) Já o cálculo de Q_s para elementos AL de um perfil "I" (Elementos que compõe a mesa) sofreu apenas pequenos ajustes em suas equações passando a ter as seguintes equações de dimensionamento para perfis "I" laminados:

$$Q_s = 1, \text{ para } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \leq 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (29.1)$$

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \cdot \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \leq 1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (29.2)$$

$$Q_s = \frac{0,69 \cdot E}{f_y \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^2}, \text{ para } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} > 1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (29.3)$$

Enquanto anteriormente a NBR880:86 apresentava as seguintes equações:

$$Q_s = 1, \text{ para } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \leq 0,55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (30.1)$$

$$Q_s = 1,42 - 0,76 \cdot \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \leq 1,02 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (30.2)$$

$$Q_s = \frac{0,67 \cdot E}{f_y \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^2}, \text{ para } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} > 1,02 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (30.3)$$

5.3 Dimensionamento ao momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , para vigas não esbeltas tem as seguintes etapas de dimensionamento com suas formulações são apresentadas a seguir.

5.4 5.3.1 Resistência ao momento fletor em relação eixo x-x ($M_{Rd,x}$)

Para assegurar a validade da análise elástica na NBR8800/08 temos,

$$M_{Rd,x} \leq \frac{1,5 \cdot W_x \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (31)$$

Assim percebe-se que em relação à versão de 1986 a nova revisão admite adotar uma maior resistência de cálculo, visto que esta mesma equação era dada por:

$$M_{Rd,x} \leq 0,9 \cdot 1,25 \cdot W_x \cdot f_y \quad (32)$$

De forma geral o momento fletor nominal resistente $M_{n,x}$ é calculado em ambas as versões segundo a mesma curva flambagem onde pode-se dizer que:

$$M_{n,x} = M_{pl} , \text{ para } \lambda < \lambda_p \quad (33.1)$$

$$M_{n,x} = \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} , \text{ p/ } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (33.2)$$

$$M_{n,x} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} , \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (33.3)$$

Para verificação à Flambagem Lateral com torção (FLT):

O cálculo da FLT passou também por uma grande modificação, principalmente em relação ao cálculo do índice de esbeltez crítico e ao momento crítico conforme pode ser observado nas equações que se seguem:

NBR8800:08

$$\lambda = L_b / r_y , \quad \text{onde } L_b \text{ é o comprimento destravado da barra} \quad (34)$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (35)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot I_t}}{r_y \cdot I_t \cdot \beta_1} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} , \text{ onde } \beta_1 = \frac{(f_y - f_r) \cdot W_x}{E \cdot I_t} \quad (36)$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y \quad (37)$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_x , \quad \text{onde } f_r = 0,3 \cdot f_y \quad (38)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + 0,039 \cdot \frac{I_t \cdot L_b^2}{C_w} \right)} \quad (39)$$

$$M_{Rd,x} = \frac{C_b \cdot M_{N,x}}{\gamma_{a1}} \quad (40)$$

Nota: C_b pode ser tomado a favor da segurança igual a 1 em ambas as versões da norma

NBR8800:86

$$\lambda = L_b / r_y \quad (41)$$

$$\lambda_p = 1,75 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (42)$$

$$\lambda_r = \frac{0,707 \cdot C_b \cdot \beta_1}{M_r} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \beta_2 \cdot M_r^2}{\beta_1^2 \cdot C_b^2}}} , \quad (43)$$

$$\text{onde } \beta_1 = \pi \cdot \sqrt{G \cdot E \cdot I_t \cdot A_g} \quad \text{e} \quad \beta_2 = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_g \cdot (d - t_f)^2}{4 \cdot G \cdot I_t}$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y \quad (44)$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_x \quad , \quad \text{onde } f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (45)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \beta_1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda}} \quad (46)$$

$$M_{Rd,x} = 0,9 \cdot C_b \cdot M_{N,x} \quad (47)$$

Para verificação à Flambagem Local da Alma (FLA):

Já o cálculo da FLA passou apenas por pequenos ajustes nas equações conforme pode ser observado na comparação a seguir:

NBR8800:08

$$\lambda = (d - 2 \cdot t_f) / t_w \quad (48)$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (49)$$

$$\lambda_r = 5,70 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (50)$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y \quad (51)$$

$$M_r = f_y \cdot W_x \quad (52)$$

$$M_{cr} = \text{Viga esbelta (Ver anexo H da nova NBR8800)} \quad (53)$$

$$M_{Rd,x} = \frac{M_{N,x}}{\gamma_{a1}} \quad (54)$$

NBR8800:86

$$\lambda = (d - 2 \cdot t_f) / t_w \quad (55)$$

$$\lambda_p = 3,50 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (56)$$

$$\lambda_r = 5,60 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (57)$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y \quad (58)$$

$$M_r = f_y \cdot W_x \quad (59)$$

$$M_{cr} = \text{Viga esbelta (Ver anexo)} \quad (60)$$

$$M_{Rd,x} = 0,9 \cdot M_{N,x} \quad (61)$$

Para verificação à Flambagem Local da Mesa (FLM):

Igualmente, o calculo da FLM passou apenas por pequenos ajustes nas equações conforme pode ser observado na comparação a seguir:

$$\text{NBR8800:08} \quad (62)$$

$$\lambda = b_f / 2 \cdot t_f$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (63)$$

$$\lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{E / (f_y - f_r)} \quad , \quad \text{para perfis laminados onde } f_r = 0,3 \cdot f_y \quad (64)$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y \quad (65)$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_x \quad (66)$$

$$M_{cr} = \frac{0,69 \cdot E}{\lambda^2} \cdot W_x \quad , \quad \text{para perfis laminados} \quad (67)$$

$$M_{Rd,x} = \frac{M_{N,x}}{\gamma_{a1}} \quad (68)$$

$$M_{Rd,x} = \frac{M_{N,x}}{\gamma_{a1}} \quad (69)$$

$$\text{NBR8800:86} \quad (70)$$

$$\lambda = b_f / 2 \cdot t_f$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (71)$$

$$\lambda_r = 0,62 \cdot \sqrt{E / (f_y - f_r)} \quad , \quad \text{p/ perfis laminados onde } f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (72)$$

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y \quad (73)$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_x \quad (74)$$

$$M_{cr} = \frac{0,19 \cdot E}{\lambda^2} \cdot W_x \quad , \quad \text{para perfis laminados} \quad (75)$$

$$M_{Rd,x} = 0,9 \cdot M_{N,x} \quad (76)$$

5.3.2 Resistência ao momento fletor em relação eixo y-y (MRd,y)

Para assegurar a validade da análise elástica na NBR8800:08 temos,

$$M_{Rd,y} \leq \frac{1,5 \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (77)$$

Assim pode-se novamente perceber que em relação à versão de 1986 a nova revisão admite adotar uma maior resistência de cálculo, visto que esta mesma equação era dada por:

$$M_{Rd,y} \leq 0,9 \cdot 1,25 \cdot W_y \cdot f_y \quad (78)$$

Para verificação à Flambagem Local da Mesa (FLM):

Permanece a mesma curva de flambagem com as seguintes diferenças nas equações das normas:

$$\text{NBR8800:08} \quad (79)$$

$$\lambda = b_f / 2 \cdot t_f$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (80)$$

$$\lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{E / (f_y - f_r)} \quad , \quad \text{para perfis laminados onde } f_r = 0,3 \cdot f_y \quad (81)$$

$$M_{pl} = Z_y \cdot f_y \quad (82)$$

$$M_r = f_y \cdot W_y \quad (83)$$

$$M_{cr} = \frac{0,69 \cdot E}{\lambda^2} \cdot W_y \quad , \quad \text{para perfis laminados} \quad (84)$$

$$M_{Rd,y} = \frac{M_{n,y}}{\gamma_{a1}} \quad (85)$$

$$\text{NBR8800:86} \quad (86)$$

$$\lambda = b_f / 2 \cdot t_f$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{E / f_y} \quad (87)$$

$$\lambda_r = 0,55 \cdot \sqrt{E / (f_y - f_r)} \quad , \quad \text{p/ perfis laminados onde } f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (88)$$

$$M_{pl} = Z_y \cdot f_y \quad (89)$$

$$M_r = f_y \cdot W_y \quad (90)$$

$$M_{Rd,y} = 0,9 \cdot M_{N,y} \quad (91)$$

5.4.1 Dimensionamento a força cortante em relação ao eixo X

Em seções "I" fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma (Eixo xx), a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , na NBR8800:08 é dada pelos segmentos da função abaixo:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda < \lambda_p \quad (92)$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (93)$$

$$V_{Rd} = 1,24 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (94)$$

onde:

$$\lambda = (d - 2 \cdot t_f) / t_w \quad (95)$$

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{k_v \cdot E / f_y} \quad (96)$$

$$\lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{k_v \cdot E / f_y} \quad (97)$$

$$V_{pl} = 0,60 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y \quad (98)$$

Para:

$$k_v = \begin{cases} 5,00 & , \text{ para } \frac{a}{h} > 3, \text{ ou } \frac{a}{h} > \left[\frac{260}{(h/t_w)} \right]^2 \\ 5 + \frac{5}{(a/h)^2} & , \text{ para todos os outros casos} \end{cases} \quad (99)$$

onde:

a é a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes;

Já em sua revisão anterior, a NBR8800:86, pode-se notar pequenas diferenças nas equações de λ e λ_p que eram dadas por:

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{k_v \cdot E / f_y} \quad (100)$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{k_v \cdot E / f_y} \quad (101)$$

Onde:

$$k_v = \begin{cases} 5,34 + \frac{4}{(a/h)^2} & , \text{ para } a/h \geq 1 \text{ (5,34 para } a/h > 3) \\ 4 + \frac{5,34}{(a/h)^2} & , \text{ para } a/h < 1 \end{cases} \quad (102)$$

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} da NBR8800:86 é representada por uma curva diferente dada por:

$$V_n = V_{pl} \text{ , para } \lambda < \lambda_p \quad (103)$$

$$V_n = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot V_{pl} \text{ , para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (104)$$

$$V_n = 1,28 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \cdot V_{pl} \text{ , para } \lambda > \lambda_r \quad (105)$$

$$V_{Rd} = 0,9 \cdot V_n \quad (106)$$

5.4.2 Dimensionamento a força cortante em relação ao eixo Y

Em seções "I" fletidas em relação ao eixo yy, a força cortante resistente de cálculo na última revisão da norma é dada por:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \text{ , para } \lambda < \lambda_p \quad (107)$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \text{ , para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (108)$$

$$V_{Rd} = 1,24 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \text{ , para } \lambda > \lambda_r \quad (109)$$

onde:

$$\lambda = b_f / 2 \cdot t_f \quad (110)$$

$$\lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{k_v \cdot E / f_y} \text{ , com } k_v = 1,2 \quad (111)$$

$$\lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{k_v \cdot E / f_y} \text{ , com } k_v = 1,2 \quad (112)$$

$$V_{pl} = 0,60 \cdot 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_y \quad (113)$$

Na NBR8800:86 as equações são análogas às equações 103, 104 e 105 que permitem o cálculo da resistência ao cisalhamento no eixo X, tendo o valor de V_{pl} calculado conforme equação 113.

6. Resultados e comparativo da resistência do perfil “T”

Os resultados obtidos no dimensionamento e a diferença percentual entre eles estão expressas nas tabelas 2 a 5 que seguem:

TRAÇÃO (KN)			
Perfil	NBR8800:86	NBR8800:08	Diferença
W150x13,0	354,15	357,73	1%
W150x24,0	679,73	686,59	1%
W150x37,1	1056,83	1067,5	1%
W200x15,0	417,38	421,59	1%
W200x22,5	632,25	638,64	1%
W200,31,3	888,08	897,5	1%
W200x35,9	1009,35	1019,55	1%
W200x52,0	1478,03	1492,95	1%
W200x86,0	2466,22	2491,14	1%
W250x17,9	500,63	505,68	1%
W250x28,4	804,6	812,73	1%
W250x44,8	1276,2	1289,09	1%
W250x62,0	1763,33	1781,14	1%
W250x85,0	2414,47	2438,66	1%
W250x115,0	3258,68	3291,59	1%
W310x21,0	593,77	599,77	1%
W310x32,7	928,35	937,73	1%
W310x52,0	1488,83	1503,86	1%
W310x79,0	2200,28	2222,5	1%
W310x107,0	3020,17	3050,68	1%
W310x125,0	3528,23	3563,86	1%
W360x32,9	919,13	928,41	1%
W360x51,0	1430,1	1444,55	1%
W360x79,0	2227,5	2250	1%
W360x91,0	2558,93	2584,77	1%
W360x110,0	3113,77	3145,23	1%
W360x122,0	3444,53	3479,32	1%
W410x38,8	1103,63	1114,77	1%
W410x60,0	1686,15	1703,18	1%
W410x85	2415,83	2440,23	1%
W460x52,0	1471,28	1486,14	1%
W460x82,0	2328,53	2352,05	1%
W460x106,0	3011,18	3041,59	1%
W530x66,0	1852,2	1870,91	1%
W530x85,0	2396,03	2420,23	1%
W530x109,0	3093,75	3125	1%
W610x101,0	2882,93	2912,05	1%
W610x140,0	3985,43	4025,68	1%
W610x174,0	4963,28	5013,41	1%

Tabela 2 – Resultados obtidos na tração

COMPRESSÃO (KN)			
Perfil	NBR8800:86	NBR8800:08	Diferença
W150x13,0	119,16	143,16	17%
W150x24,0	255,5	312,36	18%
W150x37,1	661,65	777,53	15%
W200x15,0	129,57	152,13	15%
W200x22,5	207,87	248,3	16%
W200,31,3	467,87	566,06	17%
W200x35,9	661,61	746,92	11%
W200x52,0	1105,88	1192,13	7%
W200x86,0	1866,83	2108,74	11%
W250x17,9	139,44	159,12	12%
W250x28,4	260,38	309,5	16%
W250x44,8	735,18	877,22	16%
W250x62,0	1409,78	1364,86	-3%
W250x85,0	1939,91	2018,06	4%
W250x115,0	2665,92	2905,64	8%
W310x21,0	152,89	171,36	11%
W310x32,7	286,44	335,73	15%
W310x52,0	942,9	1037,58	9%
W310x79,0	1849,13	1738,19	-6%
W310x107,0	2575,43	2531,44	-2%
W310x125,0	2982,2	3025,5	1%
W360x32,9	386,45	390,34	1%
W360x51,0	899,47	883,55	-2%
W360x79,0	1624,56	1713,04	5%
W360x91,0	2056,29	2034,41	-1%
W360x110,0	2510,61	2585,85	3%
W360x122,0	2776,25	2917,85	5%
W410x38,8	508,62	468,81	-8%
W410x60,0	1082,54	1031,01	-5%
W410x85	1575,65	1771,88	11%
W460x52,0	747,51	703,2	-6%
W460x82,0	1555,24	1570,7	1%
W460x106,0	2039,69	2255,69	10%
W530x66,0	977,6	895,11	-9%
W530x85,0	1351,79	1404,77	4%
W530x109,0	2180,97	2171,97	0%
W610x101,0	2071,66	1817,36	-14%
W610x140,0	2938,03	2906,27	-1%
W610x174,0	4193,63	4083,41	-3%

Tabela 3 – Resultados obtidos na compressão

FLEXÃO X-X (KN.cm)			
Perfil	NBR8800:86	NBR8800:08	Diferença
W150x13,0	1426,99	1459,27	2%
W150x24,0	3610,5	3633,54	1%
W150x37,1	6565,95	6623,95	1%
W200x15,0	1988,73	2062,7	4%
W200x22,5	3559,52	3603,88	1%
W200,31,3	6504,6	6569,17	1%
W200x35,9	7822,92	7899,94	1%
W200x52,0	12417,24	12532,8	1%
W200x86,0	21716,98	21922,93	1%
W250x17,9	2616,9	2714,46	4%
W250x28,4	5550,95	5630,25	1%
W250x44,8	12045,14	12159,81	1%
W250x62,0	16748,21	17197,71	3%
W250x85,0	24291,82	24537,19	1%
W250x115,0	35635,2	35995,15	1%
W310x21,0	3402,62	3450,37	1%
W310x32,7	7169,23	7306,69	2%
W310x52,0	17034,91	17221,46	1%
W310x79,0	23452,78	25021,33	6%
W310x107,0	39115,68	39510,78	1%
W310x125,0	43505,5	43944,95	1%
W360x32,9	8667,62	8913,03	3%
W360x51,0	17698,63	17942,25	1%
W360x79,0	30540,15	30827,69	1%
W360x91,0	37027,01	37401,02	1%
W360x110,0	45558,23	46018,42	1%
W360x122,0	50295,7	50803,74	1%
W410x38,8	12200,96	12518,76	3%
W410x60,0	23876,9	24203,21	1%
W410x85	35638,95	35978,02	1%
W460x52,0	19302,59	19705,24	2%
W460x82,0	37597,65	38023,8	1%
W460x106,0	50129,01	50590,03	1%
W530x66,0	28046,4	28583,87	2%
W530x85,0	39858,73	40413,35	1%
W530x109,0	59422,27	60042,44	1%
W610x101,0	60928,14	61637,32	1%
W610x140,0	89349,68	90220,9	1%
W610x174,0	119723,34	120932,67	1%

Tabela 4 – Resultados obtidos na flexão

CORTANTE X-X (KN)			
Perfil	NBR8800:86	NBR8800:08	Diferença
W150x13,0	85,91	86,78	1%
W150x24,0	142,56	144	1%
W150x37,1	177,15	178,94	1%
W200x15,0	116,1	117,27	1%
W200x22,5	172,42	174,16	1%
W200,31,3	181,44	183,27	1%
W200x35,9	168,24	169,94	1%
W200x52,0	219,7	221,92	1%
W200x86,0	389,61	393,55	1%
W250x17,9	162,65	164,29	1%
W250x28,4	224,64	226,91	1%
W250x44,8	272,92	275,67	1%
W250x62,0	348,7	352,23	1%
W250x85,0	493,778	498,76	1%
W250x115,0	490,25	495,2	1%
W310x21,0	208,62	210,72	1%
W310x32,7	278,88	281,7	1%
W310x52,0	325,24	328,53	1%
W310x79,0	444,02	448,5	1%
W310x107,0	457,64	462,26	1%
W310x125,0	732,89	740,29	1%
W360x32,9	273,27	276,03	1%
W360x51,0	345,06	348,55	1%
W360x79,0	449,23	453,76	1%
W360x91,0	452,72	457,3	1%
W360x110,0	554,04	559,64	1%
W360x122,0	637,07	643,5	1%
W410x38,8	344,74	348,22	1%
W410x60,0	423,08	427,35	1%
W410x85	613,92	619,81	1%
W460x52,0	461,7	466,36	1%
W460x82,0	614,79	621	1%
W460x106,0	797,77	805,83	1%
W530x66,0	630,79	637,16	1%
W530x85,0	743,92	751,43	1%
W530x109,0	844,07	852,6	1%
W610x101,0	854,75	863,39	1%
W610x140,0	1091,16	1102,19	1%
W610x174,0	1164,24	1176	1%

Tabela 5 – Resultados obtidos para cortante

7. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Tração

Premissa: Ruptura pelo escoamento da seção bruta

Resultado: Nas barras submetidas ao esforço de tração simples, quando tomado por base a verificação do escoamento da seção bruta, constata-se que a mudança na formulação levou a uma pequena variação nos resultados, de aproximadamente 1%. Esta alteração se deve exclusivamente ao fato da substituição do coeficiente de resistência ϕ , que multiplicava a equação por 0,9, pelo coeficiente de ponderação da resistência γ , que divide a mesma formulação pelo valor de 1,1.

7.2 Compressão

Premissa: Comprimento de flambagem $K.L = 300$ cm

Resultado: Nas barras submetidas ao esforço de compressão verificou-se uma grande dispersão nos resultados. Isto se deve ao fato de que foi no cálculo desse esforço resistente que a revisão da norma apresentou maior mudança. As mudanças vão desde pequenos ajustes nas equações à unificação das quatro curvas de flambagem em uma só.

7.3 Flexão em torno do eixo de maior inércia

Premissas: - Vão entre eixos = 300 cm
- Comprimento destravado = 300 cm
- Coeficiente de correção do momento $C_b = 1$

Resultado: Nas barras submetidas a forças de flexão verificou-se que os perfis analisados não possuem flambagem local da alma ou da mesa, em função da razão na dimensão dos elementos que o compõem. Dessa forma, o grande limitador da resistência passou a ser a flambagem lateral com torção. Esta etapa do dimensionamento, mesmo tendo grandes mudanças nas equações de cálculo, apresentou no resultado final valores muito próximos entre si. A variação do resultado obtido pela norma de 1986 em relação à revisão de 2008 ficou na média em 1,5%.

Nota-se inclusive que apesar das equações 32 e 33 apresentarem a possibilidade de resultados com até 20% de diferença, para os perfis estudados isto não ocorre, pois mesmo se os perfis apresentassem travamento lateral por laje ou por outros elementos, a resistência seria limitada pela FLA, FLM e FLT que apresentam os mesmos valores. Nesse caso a variação no resultado do cálculo da resistência será sempre de 1% pelo mesmo motivo apresentando no item 6.1

7.4 Força cortante em relação ao eixo de maior inércia

Premissas: - Ausência de enrijecedores.
- Análise elástica

Resultado: Os pequenos ajustes feitos nas equações de cálculo não refletiram em nenhuma alteração adicional nos resultados além daquela exposta em 6.1, pois em função da geometria dos perfis analisados todos apresentaram resistência nominal igual à resistência correspondente a plastificação da alma por cisalhamento.

8. CONCLUSÃO

De forma geral observou-se nos casos estudados uma pequena mudança nos valores de resistência dos perfis, obtendo-se para estes casos geralmente valores de resistência um pouco maiores quando calculados pela última revisão da norma. Poucas exceções foram verificadas nos casos de compressão dos perfis laminados conhecidos como perfis “H”.

9. REFERENCES

American Institute of Steel Construction (AISC), 2005, *Specification for structural Buildings*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986, *NBR 8800: Projeto e Execução de estruturas de aço de edifícios*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008, *NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios*.