

1. OBJETIVOS

O trabalho propôs-se basicamente em elaborar um programa computacional que realize os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de elementos estruturais em aço, seguindo a norma técnica brasileira *ABNT-NBR 8800/86*, auxiliando o usuário na determinação das resistências de cálculo referentes aos esforços solicitantes usuais. (Auxílio financeiro da FAPESP com bolsa de Iniciação Científica)

Este manual procura apresentar em exemplos os procedimentos de cada cálculo e as informações a serem introduzidas pelo usuário e calculados e fornecidos pelo programa. Inicialmente serão apresentadas algumas informações pertinentes, como os procedimentos e formulários constantes da referida norma técnica. Posteriormente, é apresentado o programa computacional, por meio das telas de interação com o usuário.

Por fim, são apresentadas algumas considerações finais sobre os itens da referida norma não abrangidas pelo programa, a bibliografia utilizada e, em anexo, as notações utilizadas pela norma e no programa.

Os autores ainda agradecem antecipadamente quaisquer sugestões e correções que os usuários possam apresentar, buscando tornar este programa uma ferramenta útil e confiável.¹

2. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

2.1. Método dos Estados Limites

Atualmente utilizada na NBR 8800/86, pode-se afirmar que ela prioriza satisfazer às exigências de exploração da estrutura, ou seja, a estrutura perde a capacidade de resistir às influências externas ou por sofrer uma deformação excessiva ou quando ela atinge a ruína. Desta maneira, para que a estrutura esteja segura, é necessário que não sejam atingidos os estados limites resistentes.

São duas as condições para a verificação dos elementos estruturais: Estado Limite Último e Estado Limite de Utilização. Sendo que em hipótese alguma, qualquer das duas resistências, para os elementos estruturais, possa ser excedida pelas combinações de ações

¹ O engenheiro WELLINGTON YAMAMOTO, formado em 2000 na Faculdade de Engenharia de Bauru/UNESP, autor intelectual do programa computacional e deste manual, faleceu em acidente automobilístico em 26/09/2003 em sua cidade natal (Marília/SP).

aplicadas à estrutura, quando de sua utilização. Estas combinações das ações podem ser obtidas através de bibliografia normalizada, como a NBR 8681/84, em seguida citada.

O Estado Limite Último relaciona-se com a segurança da estrutura, sendo esta caracterizada por resistência máxima dúctil, flambagem, fadiga, fratura e deslizamento.

O Estado Limite de Utilização relaciona-se com a ocupação e a funcionalidade da edificação, analisando-se aspectos como deformação excessiva, vibração, corrosão, durabilidade e conforto.

2.2. ABNT-NBR 8681 / 84

Fixam-se, nesta norma, as condições de segurança nas estruturas usuais do Brasil, estabelecendo definições e critérios quanto às ações e resistências, independente de sua classe, destino ou material.

Para um melhor entendimento posterior, faz-se necessário o breve comentário da representatividade dos itens fixados nesta norma.

2.2.1. Ações

Entende-se por ação todas as causas internas e externas, que provoquem deformações e ou deslocamentos nos elementos estruturais. Como um exemplo prático, a variação de temperatura provoca deformações, causado pela dilatação ou contração, resultando em esforços que podem ser ditos como indiretos.

As ações dividem-se em permanentes, variáveis, excepcionais e acidentais.

Uma ação é considerada permanente quando esta apresentar pequena ou nenhuma variação de seus valores médios, considerando-se toda a vida útil da edificação. Exemplo, o peso próprio da estrutura, da cobertura, etc.

A ação variável caracteriza-se por apresentar grande variabilidade, em relação as suas médias, e por não estar presente em toda vida útil da estrutura. Pode-se citar, como exemplos, as sobrecargas em geral, o vento e a temperatura.

A ação excepcional, caracterizada por possuir duração extremamente curta e baixa probabilidade de ocorrência. Exemplos como colisão e explosão podem ser citados.

As cargas acidentais são consideradas nos cálculos por representarem as ações variáveis decorrentes do uso das estruturas, como exemplo, as pessoas, os veículos etc.

Determinadas as ações, tornam-se necessárias as combinações, conforme os estados limites estabelecidos, para obterem-se os esforços de cálculo.

2.2.2. Estados Limites

Defini-se o estado a qual se encontra a estrutura, para a sua livre utilização, ou necessidade de abandono, considerando-se dois estados, Estado Limite de Utilização e Estado Limite Último. Os dois estados têm como base as condições especificadas no projeto, no entanto, no primeiro caso, tem-se a possibilidade de utilização plena ou parcial, podendo estar comprometida a durabilidade da estrutura, e no segundo caso tem-se a ruína da estrutura, com o comprometimento da resistência e/ou da estabilidade.

2.2.3. Combinação de ações

Às ações atribuem-se os coeficientes de majoração e de probabilidade de ocorrência, calculando-se em quaisquer estados. Em contrapartida, as resistências do material, neste caso o aço, será minorada, dependendo das tensões a que está sendo submetido o material. Em ambos os casos, os valores para combinação das ações e das resistências encontram-se na norma NBR 8800/86.

2.3. ABNT- NBR 8800 / 86

Em 1986 regulamentou-se a norma ABNT -NBR 8800, a qual particulariza o dimensionamento pelo Método dos Estados Limites a estruturas de edifícios executadas de aço, com espessura dos elementos (perfis ou chapas) igual ou superior a 3,0 mm.

As formulações utilizadas para o procedimento de cálculo dos esforços resistentes encontram-se no item seguinte.

3. DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 8800/86

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos de cálculo definidos pela norma brasileira NBR 8800/86 relativos à determinação das resistências de cálculo de elementos estruturais em aço para os esforços normais, de tração e de compressão, fletores, cortantes e suas combinações. São referenciados os itens ou os anexos na norma correspondentes a cada procedimento apresentado.

3.1. Barras Tracionadas

A resistência de cálculo é dada por " $\phi_t.N_n$ ", sendo utilizado no dimensionamento o menor valor obtido entre dois estados limites, com a formulação descrita no item 5.2 da NBR 8800/86, como seguem abaixo.

a) quanto ao estado limite último de escoamento da seção bruta:

$$\phi_t = 0,90$$

$$N_n = A_g.f_y$$

b) quanto ao estado limite último de ruptura da seção líquida efetiva:

$$\phi_t = 0,75$$

$$N_n = A_e.f_u$$

c) Verificação quanto ao índice de esbeltez limite:

- 240 para barras principais;
- 300 para barras secundárias.

3.2. Barras Comprimidas

Descrito no item 5.3 da NBR 8800/86, a resistência de cálculo é dada por " $\phi_c.N_n$ ", onde $\phi_c = 0,90$ e a resistência nominal (N_n) igual a:

$$N_n = \rho.Q.A_g.f_y$$

O coeficiente ρ está relacionado à estabilidade global da barra e o coeficiente Q está relacionado à estabilidade local dos elementos do perfil a ser dimensionado.

Os valores de resistência se aplicam a ambos os eixos do perfil metálico, sendo os valores de ρ e Q dados pela formulação abaixo:

- Para $0 \leq \bar{\lambda} \leq 0,20$

$$\rho = 1,00$$

- Para $\bar{\lambda} \geq 0,20$

$$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\lambda^2}}$$

$$\beta = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \sqrt{\lambda^2 - 0,04 + \bar{\lambda}^2} \right)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{K \cdot l}{r} \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot f_y}{E}}$$

Os valores de α podem ser obtidos no item 5.3.4.2 e os valores de Q são calculados quando, através da relação b/t do perfil escolhido, ultrapassarem os valores limitantes de $(b/t)_{\max}$ da Tabela 01; caso contrário, Q será igual a 1,0. O cálculo do coeficiente Q está descrito no Anexo E da NBR 8800.

Em barras comprimidas tem-se, ainda, a verificação quanto ao índice de esbeltez limite, não devendo o mesmo ser superior a 200.

3.3. Barras fletidas – Momento fletor

Descrito no item 5.4 da NBR 8800/86, a resistência de cálculo é definida por “ $\phi_b \cdot M_n$ ”, onde $\phi_b = 0,90$, e a resistência nominal (M_n) calculada de acordo com o Anexo D da NBR 8800, notando-se que o cálculo é feito baseado em barras com contenção lateral descontínua, ou seja, utilizando o estado limite de flambagem lateral com torção (item 5.4.5).

São calculados todos os perfis exceto cantoneiras de abas iguais e desiguais, perfil tubular retangular e perfil circular de seção cheia.

Para o cálculo da resistência nominal (M_n) é necessária a verificação de três estados limites de flambagem: flambagem local da alma (FLA), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem lateral com torção (FLT), sendo o valor da resistência nominal o menor valor dentre as três resistências obtidas em cada estado limite.

Para o cálculo das resistências nominais, são utilizados parâmetros de esbeltez limites, como λ_p e λ_r , o primeiro referente ao momento fletor de plastificação total da seção (M_{pi}) e o segundo ao momento fletor correspondente ao limite de proporcionalidade (M_r).

No item D-2 do Anexo D, são designados intervalos de cálculo, onde:

- a) $M_n = M_{pl}$, para $\lambda \leq \lambda_p$;
- b) $M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$, para $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$;
- c) $M_n = M_{cr}$, para $\lambda_p \geq \lambda$ (não aplicável a FLA);

No entanto, para perfis “T”, há uma diferenciação:

- a) $M_n = M_r$, para $M_{cr} \geq M_r$ ou $\lambda \leq \lambda_p$;
- b) $M_n = M_{cr}$, para $M_{cr} < M_r$ ou $\lambda > \lambda_p$
(não aplicável a FLA);

Entretanto, o perfil “T”, quando sua esbelteza relativa à alma do perfil ultrapassar o limite λ_r , o Anexo D remete ao Anexo F, que define o dimensionamento de perfis “T” esbeltos, carregados somente sobre o plano médio da alma.

3.4. Barras fletidas – Força cortante

O dimensionamento descrito no item 5.5 da NBR 8800/86, a qual a resistência de cálculo é definida como “ $\phi_v \cdot V_n$ ”, onde $\phi_v = 0,90$, e a resistência nominal (V_n), para perfis “T”, “H”, “U” e caixão, fletidos em relação ao eixo perpendicular a alma, é dada por:

- a) para $\lambda \leq \lambda_p \rightarrow V_n = V_{pl}$;
- b) para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \rightarrow V_n = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot V_{pl}$;
- c) para $\lambda_r < \lambda \rightarrow V_n = 1,28 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right) \cdot V_{pl}$;

onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{f_y}}$$

$$k = 4 + \frac{5,34}{(a/h)^2}, \quad \text{para } a/h < 1$$

$$k = 5,34 + \frac{4}{(a/h)^2}, \quad \text{para } a/h > 1 \quad (k = 5,34 \text{ para } a/h > 3)$$

E para os demais casos,

3.5. Barras sujeitas a tensões combinadas

Definido no item 5.6 da NBR 8800/86, onde são definidas duas situações de interação, a primeira interagindo apenas as tensões (a) e a segunda interagindo as tensões considerando-se as estabilidades locais e globais da barra (b):

$$\text{a) } \frac{N_d}{\phi_t \cdot N_n} + \frac{M_{dx}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{dy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1 \quad (\text{item 5.6.1.3.1});$$

$$\text{b) } \frac{N_d}{\phi_c \cdot N_n} + \frac{C_{mx} \cdot M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 \cdot N_{ex}}\right) \cdot \phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{C_{my} \cdot M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 \cdot N_{ey}}\right) \cdot \phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1 \quad (\text{item 5.6.1.3.2}).$$

Para o caso de combinação entre força normal de tração e momentos fletores, verifica-se apenas a primeira inequação de interação e para a combinação entre o esforço de compressão e momentos fletores, verificam-se as duas inequações de interação.

4. PROGRAMA COMPUTACIONAL

Neste item faz-se a apresentação da estrutura do aplicativo Delphi e, em seguida, apresentam-se alguns exemplos dos procedimentos para determinação das resistências de cálculo de elementos estruturais em aço para os esforços normais, de tração e de compressão, fletores, cortantes e suas combinações. São comentados alguns passos seguidos na elaboração do programa computacional para solução interna de alguma opção que não caberia ao usuário realizar ou de algum problema matemático como, por exemplo, divisão por zero ou raiz quadrada de número negativo. Também são apresentados alguns avisos ao longo do programa para que o usuário tenha clareza de como segue o processo de cálculo e de como deve proceder para seguir adiante.

4.1. Estrutura do Delphi 4.0

A *Inprise Corporation* desenvolveu um aplicativo com formatação em janelas do tipo *Windows*, denominado *Borland Delphi*. Este, aplicado à construção de softwares, permite ao usuário final uma visualização "amigável" na entrada e/ou saída de dados.

Com o intuito de se fazer um programa em formato *Windows* escolheu-se o aplicativo *Borland Delphi 4.0*.

O *Delphi 4.0* possui formulários, onde dados podem ser inseridos e utilizados em unidades, denominadas *unit*. A *unit* é responsável pelo processamento de cálculos e do funcionamento do programa como um todo; nela identificam-se as variáveis, as funções e os procedimentos, podendo ser global ou particular.

Definidos alguns identificadores do *Delphi 4.0*, alterna-se o rumo nos procedimentos empregados no dimensionamento de perfis metálicos.

4.2. Fluxogramas

Os fluxogramas referentes aos esforços de tração, compressão, flexão simples, força cortante e esforços combinados encontram-se em anexo.

4.3. Barras Tracionadas

Neste tópico, apresenta-se um exemplo prático de barra tracionada, com o cálculo feito de forma manual e por meio do programa computacional.

Dimensionar a barra formada por duas cantoneiras, de comprimento $L = 4,0m$, ligada em suas extremidades por três parafusos alinhados de diâmetro 6,3 mm, com os seguintes esforços solicitantes (aço MR 250):

- $N_g = 100 \text{ kN}$ (ação permanente);
- $N_{q1} = 50 \text{ kN}$ (sobrecarga);
- $N_{q2} = 80 \text{ kN}$ (vento 1);
- $N_{q3} = -95 \text{ kN}$ (vento 2).

Cálculo manual:

a) Solicitação de cálculo

Aplicando-se as formas de combinação determinadas na NBR 8681 e na NBR 8800 têm-se duas combinações de esforços para a estrutura, uma desfavorável e uma favorável.

Combinação desfavorável: $N_d = 1,3.100 + 1,4.80 + 1,5.50.0,6 = 287 \text{ kN}$

Combinação favorável: $N_d = 1,0.100 + 1,4.(-95) = -33 \text{ kN}$

b) Estimativa de seção

Através da área e do raio de giração, escolhem-se perfis os quais podem se enquadrar dentro do necessário.

$$A_g = \frac{N_d}{0,9 \cdot f_y} = \frac{287}{0,9 \cdot 25} = 12,75 \text{ cm}^2$$

Procurando manter o índice de esbeltez λ entre valores de 150 e 200, resultando em raio de giração entre 2,67 e 2,00, respectivamente, com valor aplicado ao eixo de menor valor.

c) Opções de perfis

1 - $\text{I} 4,445 \times 4,445 \times 0,794 \text{ cm}$ ($1\frac{3}{4}'' \times 1\frac{3}{4}'' \times 5/16''$)

$$A_g = 12,90 \text{ cm}^2$$

$$r_x = 1,32 \text{ cm}$$

$$r_y = 2,05 \text{ cm}$$

2 - $\text{I} 6,35 \times 6,35 \times 0,794 \text{ cm}$ ($2\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}'' \times 1/4''$)

$$A_g = 15,34 \text{ cm}^2$$

$$r_x = 1,96 \text{ cm}$$

$$r_y = 2,90 \text{ cm}$$

A primeira opção não será utilizada, devido ao seu raio de giração resultar índice de esbeltez superior a 240 ($\lambda = 303$).

d) Estado limite último de escoamento da seção bruta

$$R_c = 0,9.15,34.25 = 345,15 \text{ kN}$$

d) Estado limite último de ruptura da seção líquida efetiva

$$A_n = A_g - A_{\text{furos}}$$

$$A_{\text{furo}} = 0,794.(0,63+0,15+0,20) = 0,778 \text{ cm}^2$$

$$A_n = 15,34 - 0,778.2 = 13,78 \text{ cm}^2$$

De acordo com o item 5.1.1.3.b da NBR 8800, o valor de C_t é igual a 0,85.

$$\therefore A_e = 0,85.13,72 = 11,72 \text{ cm}^2$$

então,

$$\therefore R_c = 0,75.11,72.40 = 351,49 \text{ kN}$$

Portanto, o valor adotado como resistência do perfil é de 345,15 kN, estando este valor acima do esforço solicitante de cálculo.

e) Verificação da esbeltez da barra

Adota-se como valor de raio de giração o menor valor entre os dois eixos, ou seja, neste exemplo, $r = r_x = 1,96$; tem-se então:

$$\lambda = \frac{L}{r} = \frac{400}{1,96} \approx 204$$

$\lambda < 240 \rightarrow \text{OK!}$

Desta maneira, o perfil escolhido está dimensionado e verificado.

Cálculo utilizando o programa:

Alguns itens da forma calculada anteriormente serão aproveitados: o esforço solicitante, os perfis escolhidos, a área líquida e o valor de C_t .

Possuindo uma tela principal, esta redireciona a todas as outras utilizadas no programa:

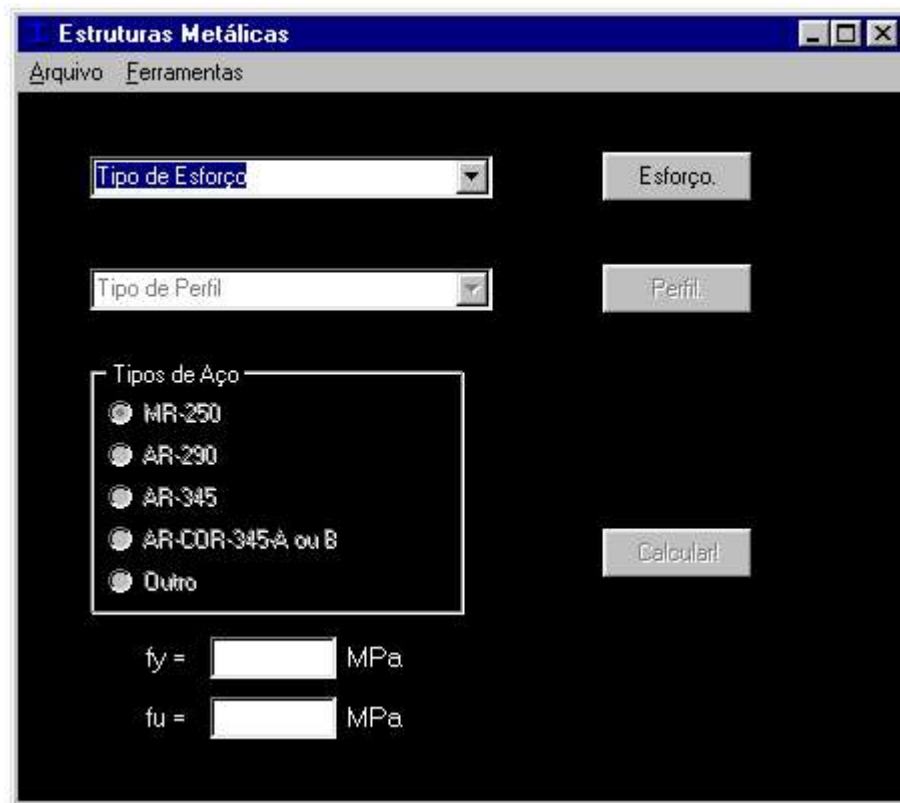


Figura 1. Tela principal do programa.

Escolhe-se o tipo de esforço e clica-se no botão “Esforço”, aparecendo, então, a tela mostrada na Figura 2, onde devem ser inseridos os valores dos comprimentos de flambagem, primeiramente, em relação ao eixo x e posteriormente, na próxima tela, em relação ao eixo y, juntamente com a vinculação da barra para cada eixo em questão.

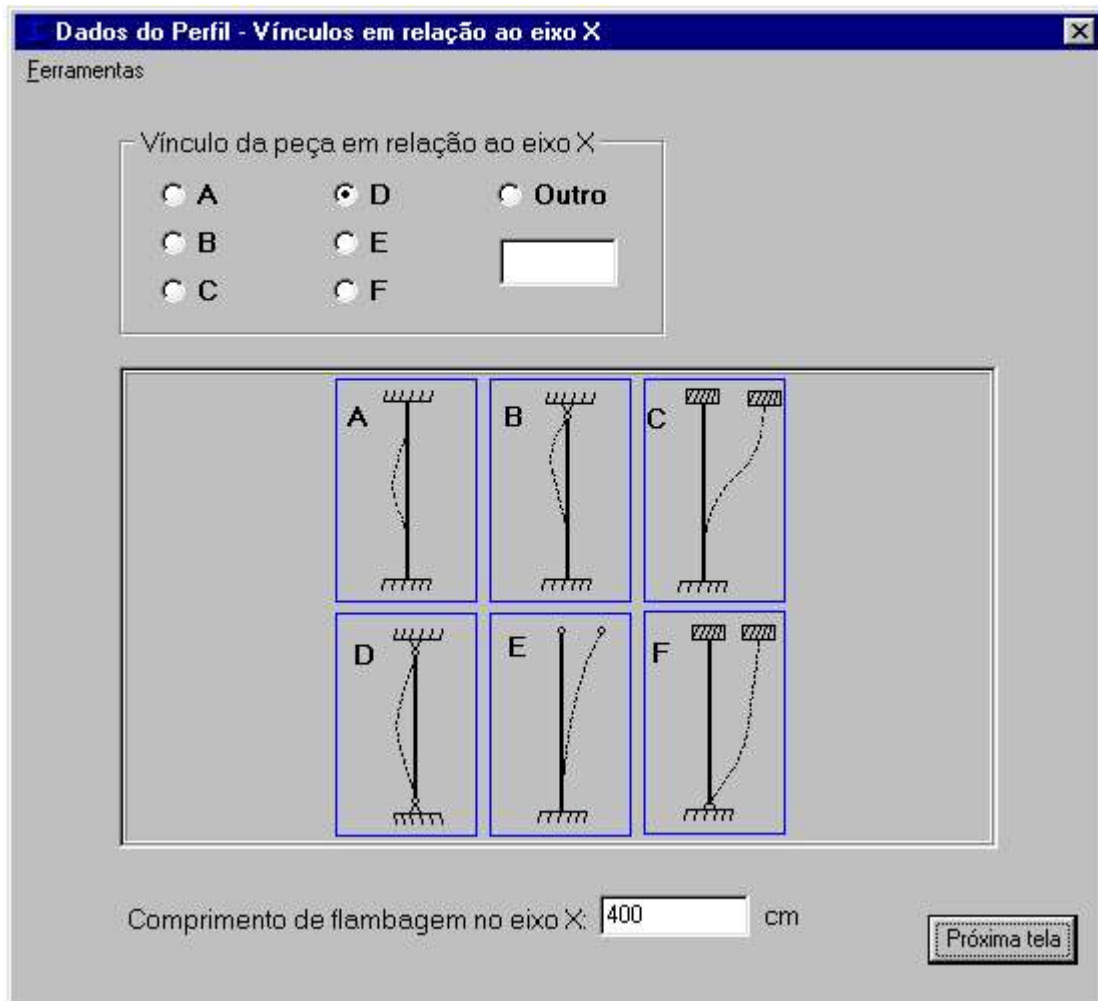


Figura 2. Tela para inserção do tipo de vinculação e comprimento da barra para o perfil.

O próximo passo a ser realizado no programa é a escolha de um tipo de perfil, neste caso uma cantoneira dupla de abas iguais e, clicando-se no botão “Perfil”, surgirá a tela mostrada na Figura 3. Os valores das dimensões “A”, espessura da cantoneira “e” e espessura da chapa de ligação “c” devem ser inseridos nos respectivos campos dados na tela.

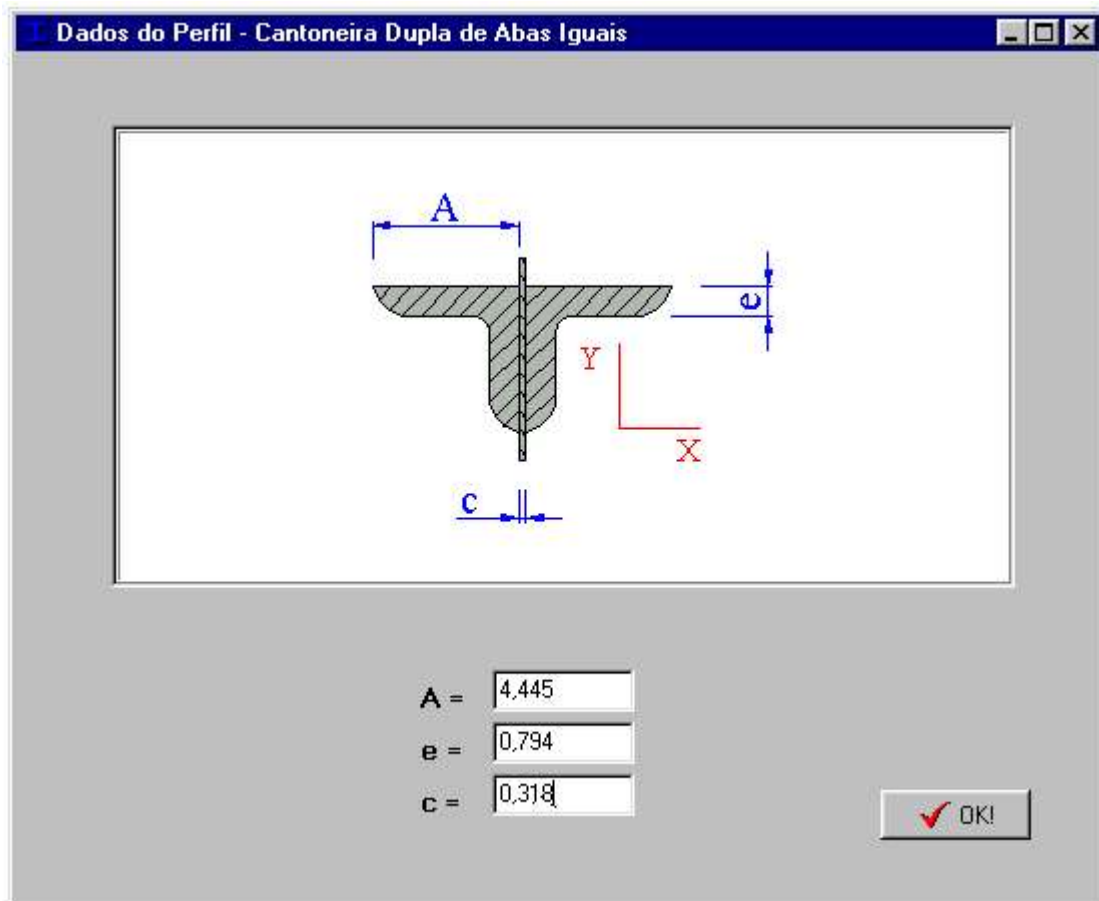


Figura 3. Primeira tela de entrada de dados do perfil.

Uma tela de confirmação dos dados de entrada é apresentada e, em seguida, por se tratar de perfil laminado, surgirá outra tela para a inserção de mais alguns dados do perfil e mais uma tela de confirmação:

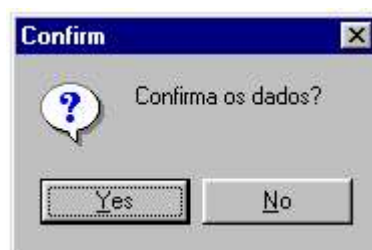


Figura 4. Tela de confirmação.

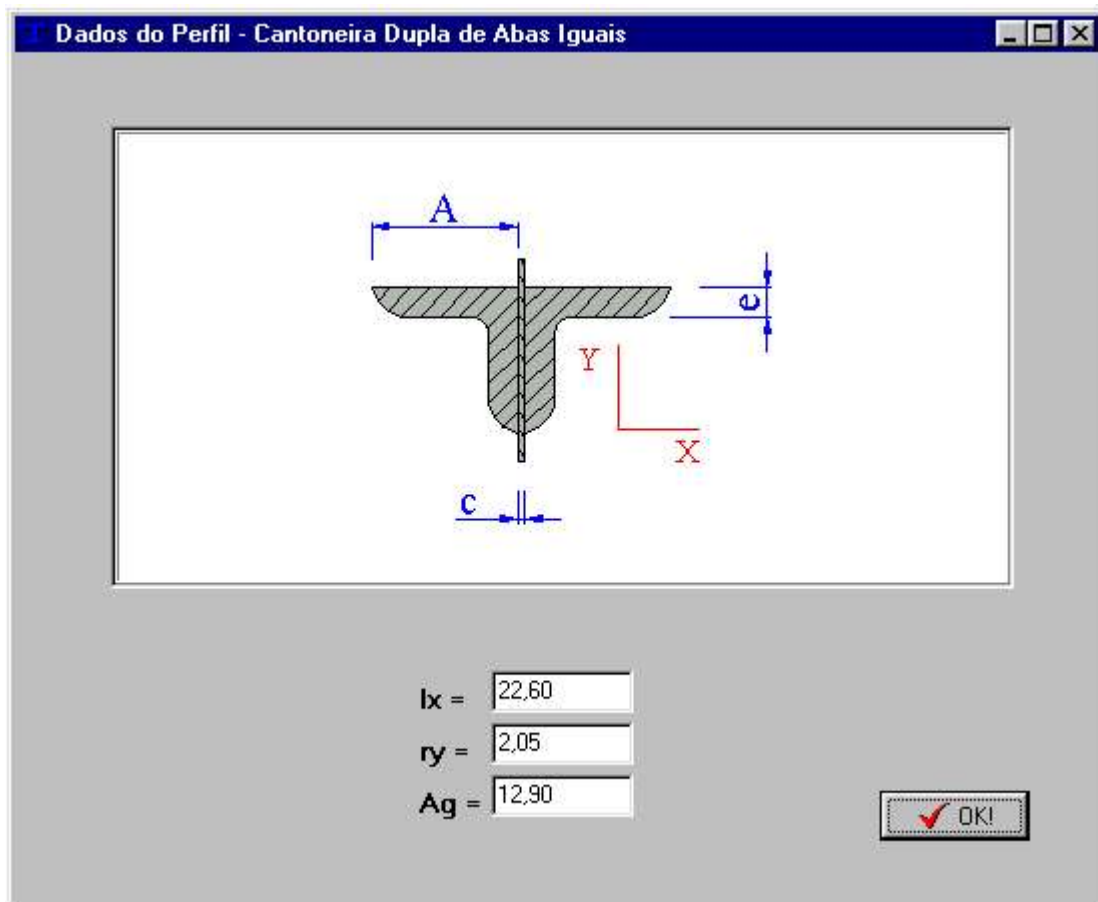


Figura 5. Tela de entrada de dados apresentada em perfis laminados, à tração e compressão.

Para este perfil, retornará o seguinte aviso:



Figura 6. Tela indicando esbeltez excessiva.

É necessária, então, a escolha de outro perfil. Adota-se, então o segundo perfil: $\text{I} 2\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$ ". O programa retornará à tela indicada pela figura 3, sendo necessários os demais passos até a figura 5. Deve-se notar a possibilidade de se continuar calculando com o mesmo perfil, porém este estará fora dos parâmetros exigidos por norma, a menos que diminua-se o comprimento livre da barra com uma vinculação intermediária.

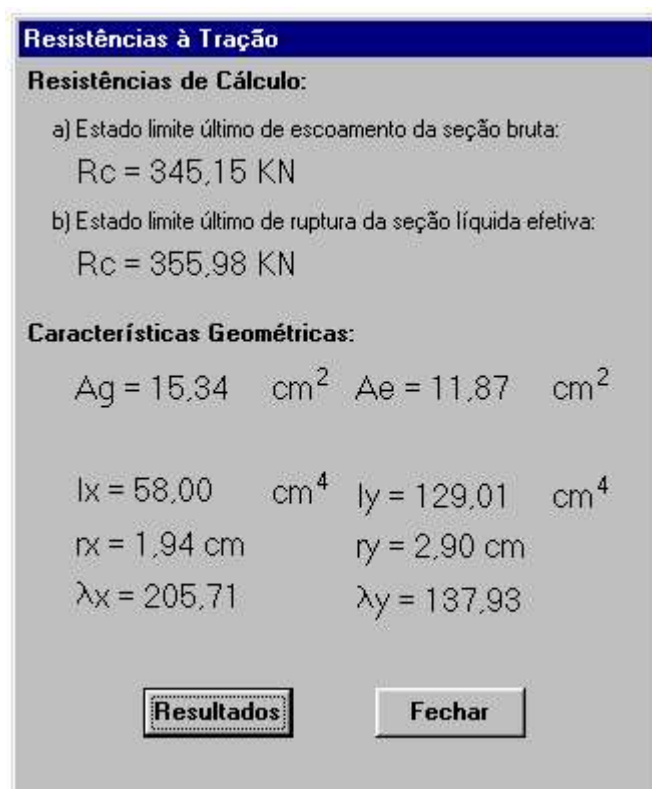
Com o novo perfil é necessária a entrada dos valores de C_t e A_n , como mostra a figura abaixo:



A tela de entrada de dados adicionais, intitulada "Dados Adicionais", apresenta dois campos de entrada de texto. O primeiro campo, rotulado "Ct =", contém o valor "0,85". O segundo campo, rotulado "An =", contém o valor "13,96". Abaixo dos campos, há um botão "OK!" para confirmar a entrada.

Figura 7. Tela para entrada dos valores de C_t e A_n .

O próximo passo é a escolha do tipo de aço. Neste caso, o aço é o MR 250; seleciona-se este tipo e clica-se o botão "Calcular!". Será mostrada uma tela com os resultados. Os resultados deste exemplo são mostrados como na figura abaixo.



A tela de apresentação dos resultados, intitulada "Resistências à Tração", exibe os seguintes dados:

Resistências de Cálculo:

- a) Estado limite último de escoamento da seção bruta:
 $R_c = 345,15 \text{ KN}$
- b) Estado limite último de ruptura da seção líquida efetiva:
 $R_c = 355,98 \text{ KN}$

Características Geométricas:

$A_g = 15,34 \text{ cm}^2$	$A_e = 11,87 \text{ cm}^2$
$I_x = 58,00 \text{ cm}^4$	$I_y = 129,01 \text{ cm}^4$
$r_x = 1,94 \text{ cm}$	$r_y = 2,90 \text{ cm}$
$\lambda_x = 205,71$	$\lambda_y = 137,93$

Na base da tela, há dois botões: "Resultados" e "Fechar".

Figura 8. Tela de apresentação dos resultados para o esforço de tração.

Clicando-se no botão “Fechar”, surge a tela onde se pode refazer alguma outra etapa como a verificação de outro tipo de esforço ou de aço ou ainda de outro perfil.

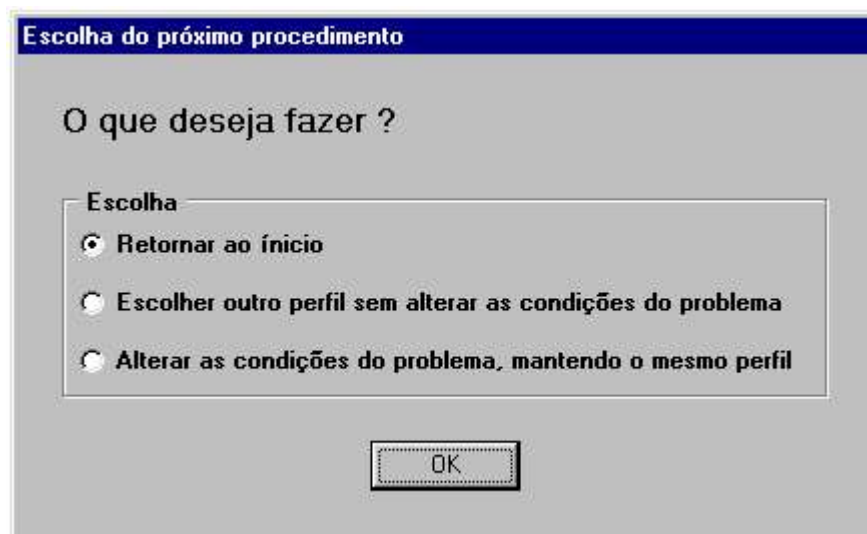


Figura 9. Tela com a escolha da próxima etapa.

Após esta tela, feita a opção, o usuário a executa ou fecha o aplicativo.

4.4. Barras Comprimidas

Exemplificando-se este tópico, assim como apresentado para barras tracionadas, apresentando-se primeiramente na forma manual e em seguida por meio do programa computacional, segue o enunciado do problema:

Calcular a resistência de cálculo de uma coluna com $L = 4,0$ m, submetida a esforços de compressão, aço AR-345, com o seguinte perfil 'T':

- $d = 60,0$ cm;
- $h = 57,5$ cm;
- $b_f = 40,0$ cm;
- $t_f = 1,25$ cm;
- $t_w = 0,8$ cm;
- $A_g = 146,0$ cm²;
- $I_x = 98976,04$ cm⁴ e $I_y = 13335,76$ cm⁴

Cálculo manual:

a) Cálculo do coeficiente de redução para a flambagem local (Q)

De acordo com a Tabela 1 da NBR 8800, o valor da relação largura/espessura máximo $(b/t)_{\max}$ para a mesa é 13,00 e para a alma é 36,00. Assim,

- mesa (elemento não enrijecido)

$$b_{\text{mesa}} = 20,0 \text{ cm}$$

$$t_{\text{mesa}} = 1,25 \text{ cm}$$

$$\frac{b}{t} = \frac{20}{1,25} = 16 > \left(\frac{b}{t}\right)_{\max} \rightarrow \text{anexo E}$$

No item E-2.b, referente a elemento não enrijecido, tem-se:

$$1,02 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 24,86$$

$$\therefore Q_s = 1,42 - 0,76 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 0,921$$

- alma (elemento enrijecido)

$$b_{\text{alma}} = 57,5 \text{ cm}$$

$$t_{\text{alma}} = 0,8 \text{ cm}$$

$$\frac{b}{t} = \frac{57,5}{0,8} = 71,88 > \left(\frac{b}{t}\right)_{\max} \rightarrow \text{anexo E}$$

No item E-3.b, referente a elemento enrijecido, o valor do coeficiente Q_a é obtido por meio de um processo iterativo iniciado pelo valor inicial adotado de tensão atuante “f”, como segue abaixo os passos de cálculo, no entanto, no caso de o usuário não introduzir o valor de esforço de cálculo atuante N_d , optou-se por adotar internamente ao programa computacional o valor de $0,90 \cdot A_g \cdot f_y$ para N_d .

- Passo inicial:

$$f = \frac{N_d}{A_{ef}} = \frac{0,9 \cdot A_g \cdot f_y}{A_g} = \frac{0,9 \cdot 146 \cdot 34,5}{57,5 \cdot 0,8 + 100} = 31,05 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$b_{ef} = \frac{797t}{\sqrt{f}} \left(1 - \frac{140}{\left(\frac{b}{t}\right) \cdot \sqrt{f}} \right) = \frac{797 \cdot 0,8}{\sqrt{310,5}} \left(1 - \frac{140}{71,88 \cdot \sqrt{310,5}} \right) \leq b$$

$$b_{ef} = 32,54 \text{ cm} < b$$

- Segundo passo:

$$f = \frac{N_d}{A_{ef}} = \frac{0,9 \cdot 146 \cdot 34,5}{32,54 \cdot 0,8 + 100} = 35,97 \text{ kN / cm}^2$$

$$b_{ef} = \frac{797 \cdot t}{\sqrt{f}} \cdot \left(1 - \frac{140}{\left(\frac{b}{t} \right) \cdot \sqrt{f}} \right) = \frac{797 \cdot 0,8}{\sqrt{359,7}} \cdot \left(1 - \frac{140}{71,88 \cdot \sqrt{359,7}} \right) \leq b$$

$$b_{ef} = 30,17 \text{ cm} < b$$

- Terceiro passo:

$$f = \frac{N_d}{A_{ef}} = \frac{0,9 \cdot 146 \cdot 34,5}{30,17 \cdot 0,8 + 100} = 36,52 \text{ kN / cm}^2$$

$$b_{ef} = \frac{797 \cdot t}{\sqrt{f}} \cdot \left(1 - \frac{140}{\left(\frac{b}{t} \right) \cdot \sqrt{f}} \right) = \frac{797 \cdot 0,8}{\sqrt{365,2}} \cdot \left(1 - \frac{140}{71,88 \cdot \sqrt{365,2}} \right) \leq b$$

$$b_{ef} = 29,96 \text{ cm} < b$$

A diferença entre o valor obtido de b_{ef} no último passo e o valor do passo anterior é de menos de 1%; desta maneira o programa assume como b_{ef} o valor final de 29,96cm.

$$\therefore Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{29,96 \cdot 0,8 + 100}{146} = 0,849$$

$$\therefore Q = Q_s \cdot Q_a = 0,921 \cdot 0,849 = 0,782$$

b) Cálculo do coeficiente de redução para a estabilidade global (ρ)

para o eixo de inércia y:

$$r_{\min} = r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = \sqrt{\frac{13335,79}{146}} = 9,56 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r_{\min}} = \frac{1,0 \cdot 400}{9,56} = 41,84$$

$$\bar{\lambda} = \frac{41,84}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,782 \cdot 34,5}{20500}} = 0,48$$

De acordo com a Tabela 3 da NBR 8800, utiliza-se, para o eixo y, a curva C, obtendo-se o valor de $\rho = 0,856$.

c) Resistência de cálculo em relação ao eixo y

$$N_c = 0,9 \cdot 0,856 \cdot 0,782 \cdot 146.34,5 = 3034,55 \text{ kN}$$

A resistência de cálculo para o eixo x não é aqui calculada pelo fato de o momento de inércia em relação a este eixo ser superior ao do eixo y, para o mesmo comprimento de flambagem.

Cálculo utilizando o programa:

Inicia-se o processo com a tela principal dada pela Figura 1, onde, selecionando-se o respectivo esforço, surge a mesma tela mostrada na Figura 2.

Inseridos os valores dos tipos de vinculação e comprimentos de flambagem, em relação ao eixo x e y, escolhe-se o perfil, neste caso um perfil “I” soldado, e inserem-se as dimensões do perfil, conforme mostrado na Figura 10.

Dados do Perfil - Perfil "I" ou "H" Soldado

Forneça os dados da seção transversal do perfil na unidade cm:

d =
h =
bf =
tf =
tw =

Figura 10. Tela para a entrada de dados do perfil escolhido.

Inseridos os respectivos valores das dimensões do perfil, é mostrada a tela de confirmação dada pela figura 3; desta forma, por se tratar de um perfil soldado, é mostrada a tela com os valores de área bruta, momentos de inércia e raios de giração, calculados automaticamente pelo programa.

Características Geométricas

$A_g = 146,00 \text{ cm}^2$
 $I_x = 98976,04 \text{ cm}^4$ $I_y = 13335,79 \text{ cm}^4$
 $r_x = 26,04 \text{ cm}$ $r_y = 9,56 \text{ cm}$

Figura 11. Tela com os valores das características geométricas calculadas.

Inseridos estes valores, escolhe-se o tipo de aço e clica-se o botão “Calcular!”. Para este exemplo, aparece uma tela de aviso, mostrada na figura 12, e em seguida outra caixa de diálogo para confirmação. Este aviso aparece pelo fato de o valor de $\bar{\lambda}$ resultar menor do que 0,2. Duas possibilidades no processo de cálculo fazem com que isto ocorra:

- **esbeltez excessiva de alma ou de mesa**, acarretando a obtenção de um valor muito pequeno de Q e, conseqüentemente, de um valor negativo na raiz quadrada na fórmula de β , constante no item 4.2 deste relatório. *É necessária a modificação do perfil!*
- **esbeltez global da barra muito pequena**, resultando em valor de $\rho = 1,0$

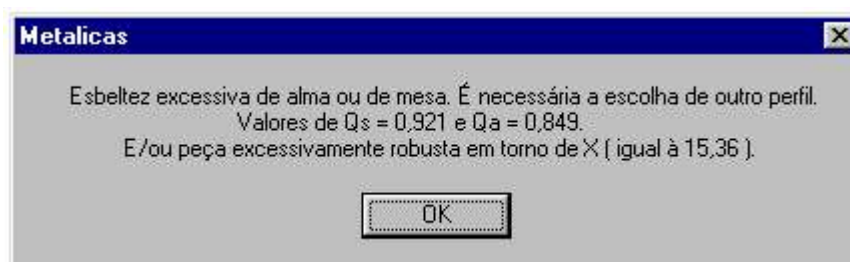


Figura 12. Tela de aviso, demonstrando problema.

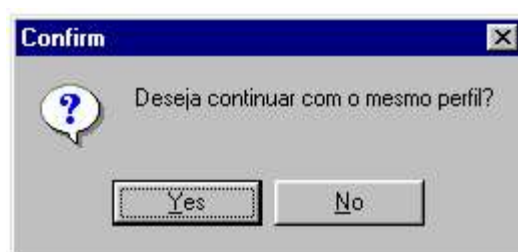


Figura 13. Tela de confirmação.

Caso seja escolhido prosseguir o cálculo com o mesmo perfil, são mostrados todos os resultados relativos às barras comprimidas, conforme mostrados na figura 14; caso contrário, retornar-se-á à tela de inserção das novas dimensões do mesmo tipo de perfil.

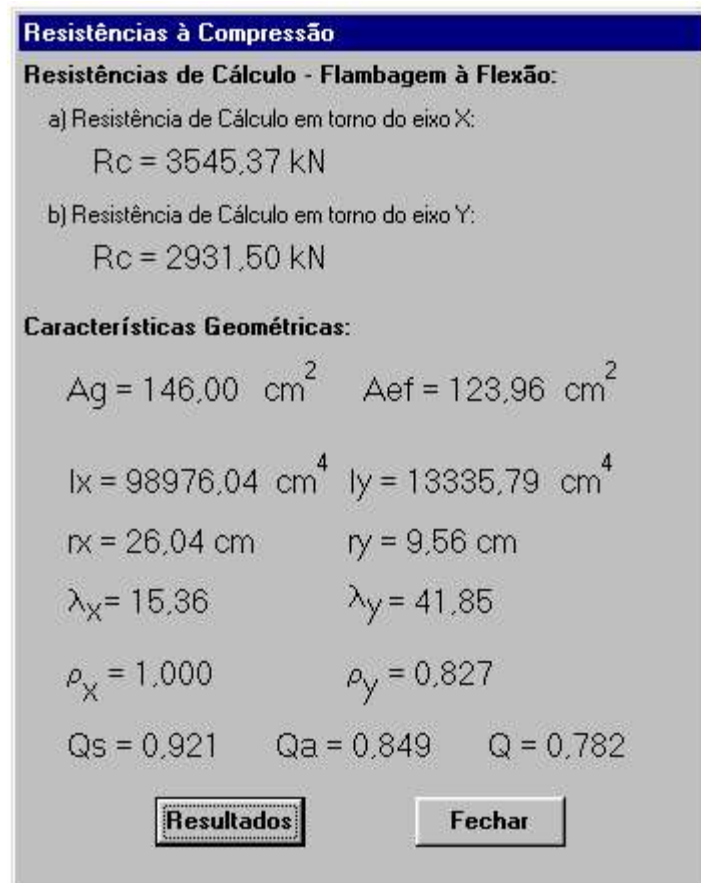


Figura 14. Tela de apresentação dos resultados para o dimensionamento à compressão.

Fechando-se a tela de resultados, aparecerá a tela mostrada na figura 9, devendo o usuário escolher a próxima etapa que lhe convier.

A diferença entre os dois valores de resistência de cálculo obtidos, $N_c = 3034,55 \text{ kN}$ para a forma manual e $N_c = 2931,50 \text{ kN}$ para o programa, da ordem de 3,4%, se deve à distinção dos valores de ρ calculados em cada um deles, o primeiro obtido por tabela ($\rho=0,856$) e o segundo pela formulação apresentada no item 4.2 deste relatório ($\rho=0,827$), ambas constantes na norma.

4.5. Barras fletidas – Momento fletor

Exemplificando-se este tópico, assim como apresentado para os esforços anteriores, apresentando-se primeiramente na forma manual e em seguida por meio do programa, segue o enunciado do problema:

Para uma viga simplesmente apoiada, calcular suas resistências de cálculo em relação aos dois eixos de inércia, considerando os comprimentos $L_{bx} = L_{by} = 6,0$ m sem pontos contraventados lateralmente, exceto nas extremidades, com o seguinte perfil 'I' (aço MR-250):

- $d = 355$ mm;
- $h = 305$ mm;
- $bf = 190$ mm;
- $t_f = 25,0$ mm;
- $t_w = 8,0$ cm;
- $A_g = 119,40$ cm²;
- $I_x = 27804,70$ cm⁴, $I_y = 2859,20$ cm⁴, $r_x = 15,26$ cm e $r_y = 4,89$ cm;
- $W_x = 1566,50$ cm³ e $W_y = 301$ cm³;
- $I_T = 203,122$ cm⁴ e $r_T = 5,26$ cm;
- $C_w = 664942,70$ cm⁶.

sendo que,

L_{bx} - refere-se ao comprimento sem contenção lateral da viga para FLT em torno do eixo x (flexão em relação ao eixo y); e

L_{by} - refere-se ao comprimento sem contenção lateral da viga para FLT em torno do eixo y (flexão em relação ao eixo x).

Cálculo manual:

a) Cálculo da resistência nominal para a flambagem lateral da mesa (FLM)

De acordo com o Anexo D, tabela 27, da NBR 8800, o valor de λ_p é igual a:

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 10,88$$

e, com os valores, para o elemento não enrijecido de:

$$b_f = 95 \text{ mm}$$

$$t_f = 25 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} = \frac{95}{25} = 3,8 < \lambda_p \therefore$$

Com Z_x igual a

$$M_n = M_{pl} = Z_x \cdot f_y$$

$$Z_x = b_f \cdot t_f \cdot (d - t_f) + 0,25 \cdot t_w \cdot (d - 2 \cdot t_f)^2 = 1754$$

cm³

resulta, portanto,

$$M_n = Z_x \cdot f_y = 1754 \times 25 = 43.850 \text{ kN.cm}$$

Obs: Para a flexão em relação ao eixo de menor inércia, neste caso o eixo y, a norma não contempla esta verificação de esbeltez, definindo diretamente o valor de resistência nominal como sendo:

$$M_{ny} = M_{ply}$$

b) Cálculo da resistência nominal para a flambagem lateral da alma (FLA)

De acordo com o Anexo D, tabela 27, da NBR 8800, o valor de λ_p é igual a

$$\lambda_p = 3,50 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 100,23$$

e, com os valores, para o elemento enrijecido:

$$h = 305 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,0 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{305}{8} = 38,125 < \lambda_p \therefore M_n = M_{pl} = Z_x \cdot f_y$$

Desta maneira,

$$M_n = 43.850 \text{ kN.cm.}$$

Para este exemplo não foi necessário que o cálculo fosse realizado utilizando o Anexo F, para vigas “I” esbeltas, para flexão em relação ao eixo de maior inércia.

Obs: Para a flexão em relação ao eixo de menor inércia, neste caso o eixo y, a norma não contempla o cálculo da resistência nominal para perfis esbeltos ($\lambda > \lambda_r$). Caso o perfil seja esbelto, recomenda-se então a escolha de outro perfil que apresente esbeltez menor do este limite.

c) Cálculo da resistência nominal para a flambagem lateral a torção (FLT)

O parâmetro de esbeltez da barra para a flambagem lateral com torção é:

$$\lambda = \frac{L_{by}}{r_y} = \frac{600}{4,89} = 122,70$$

De acordo com a tabela 27 da NBR 8800, tem-se:

$$\lambda_p = 1,75 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 50,11$$

Como $\lambda > \lambda_p$, é necessário o cálculo de λ_r , onde são adotados os valores de $C_b = 1,0$ (a favor da segurança) e $f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2$ (fornecido pelo Anexo D):

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_x = (25 - 11,5) \cdot 1566,5 = 21147,75 \text{ kN.cm}$$

$$\beta_1 = \pi \cdot \sqrt{G \cdot E \cdot I_T \cdot A_g} = \pi \cdot \sqrt{0,385 \cdot 20500 \cdot 20500 \cdot 203,122 \cdot 119,4} = 6223214,121 \text{ kN.cm}$$

$$\beta_2 = 6,415 \cdot \frac{A_g \cdot (d - t_f)^2}{I_T} = 6,415 \cdot \frac{119,4 \cdot (35,5 - 2,5)^2}{203,122} = 4106,50$$

$$\lambda_r = \frac{0,707 \cdot C_b \cdot \beta_1}{M_r} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \beta_2}{C_b^2 \cdot \beta_1^2} \cdot M_r^2}} = 300,83$$

Logo, sendo $\lambda_p = 50,11$, $\lambda = 122,70$ e $\lambda_r = 300,83$, tem-se:

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$$

e para este caso,

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} = 43850 - (43850 - 21147,75) \cdot \frac{122,70 - 50,11}{300,83 - 50,11}$$

$$M_n = 37277,11 \text{ kN.cm}$$

Comparando-se os valores obtidos para M_n considerando-se os três estados de flambagem (FLM, FLA, FLT), emprega-se o menor valor dentre eles que é:

$$M_n = 37277,11 \text{ kN.cm}$$

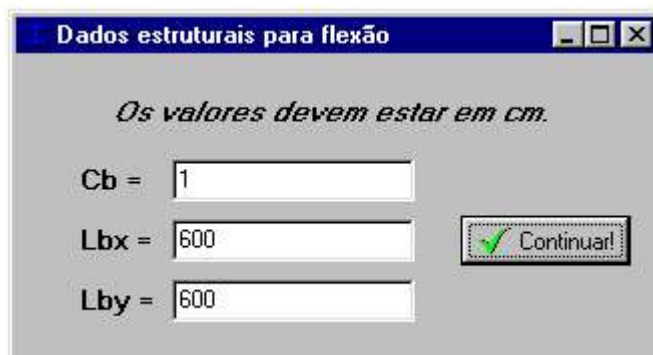
d) Resistência de cálculo à flexão simples

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9 \cdot 37277,11 = 33549,40 \text{ kN.cm}$$

A resistência de cálculo em relação ao eixo y não será calculada aqui pelo fato de a flexão ocorrer em torno do eixo de maior inércia, ou seja, do eixo x. Será calculada pelo programa, que sempre apresentará as resistências nominais e de cálculo em relação aos dois eixos do perfil escolhido.

Cálculo utilizando o programa:

Inicia-se o processo com a tela principal dada pela figura 1, onde, selecionando-se o respectivo esforço, surge a tela mostrada na Figura 15. Nesta tela é necessário inserir os valores de C_b e os comprimentos sem contenção lateral da viga para flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente.



Dados estruturais para flexão

Os valores devem estar em cm.

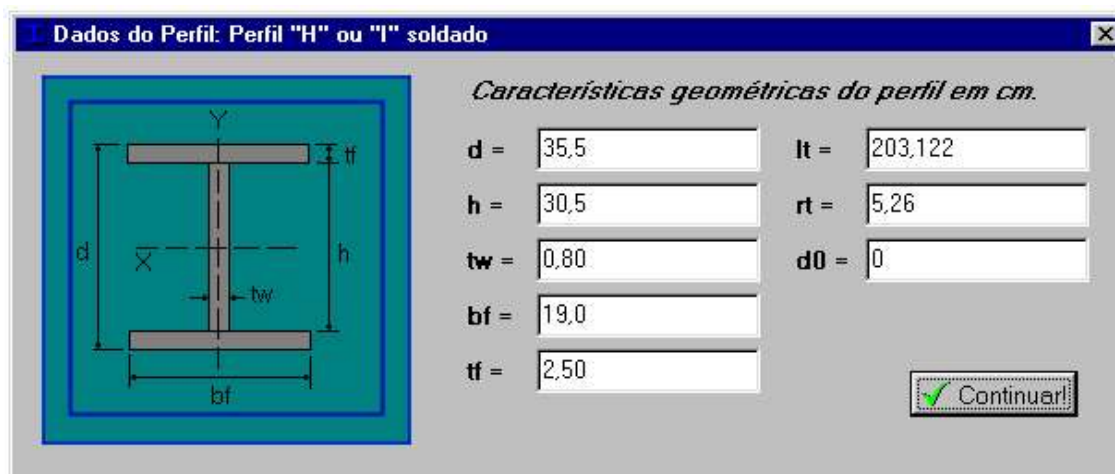
Cb =

Lbx =

Lby =

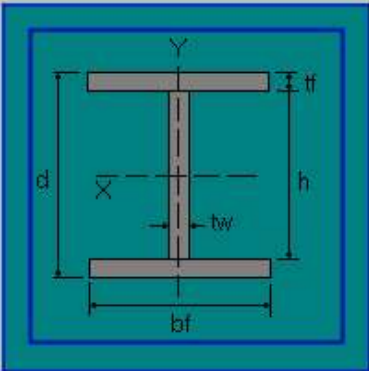
Figura 15. Tela para inserção de C_b , L_{bx} e L_{by} .

Em seguida, escolhe-se o respectivo perfil, neste caso um perfil "I" soldado, inserindo-se os valores das dimensões do mesmo, como mostrada na Figura 16.



Dados do Perfil: Perfil "H" ou "I" soldado

Características geométricas do perfil em cm.



d = It =

h = rt =

tw = d0 =

bf =

tf =

Figura 16. Tela com dimensões e características geométricas do perfil solicitado à flexão.

Em seguida é mostrada a tela (Figura 17), com os demais valores das características geométricas pertinentes ao restante do cálculo.

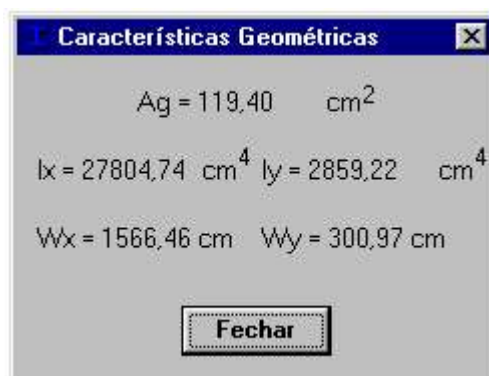


Figura 17. Tela com características geométricas do perfil.

Depois de inseridos os valores necessários para o dimensionamento à flexão, escolhe-se o tipo de aço, neste exemplo aço MR-250, e clica-se no botão “Calcular!”. Será mostrada, então, a tela com os resultados à flexão da barra (Figura 18), com resultados pertinentes para entendimento do usuário.

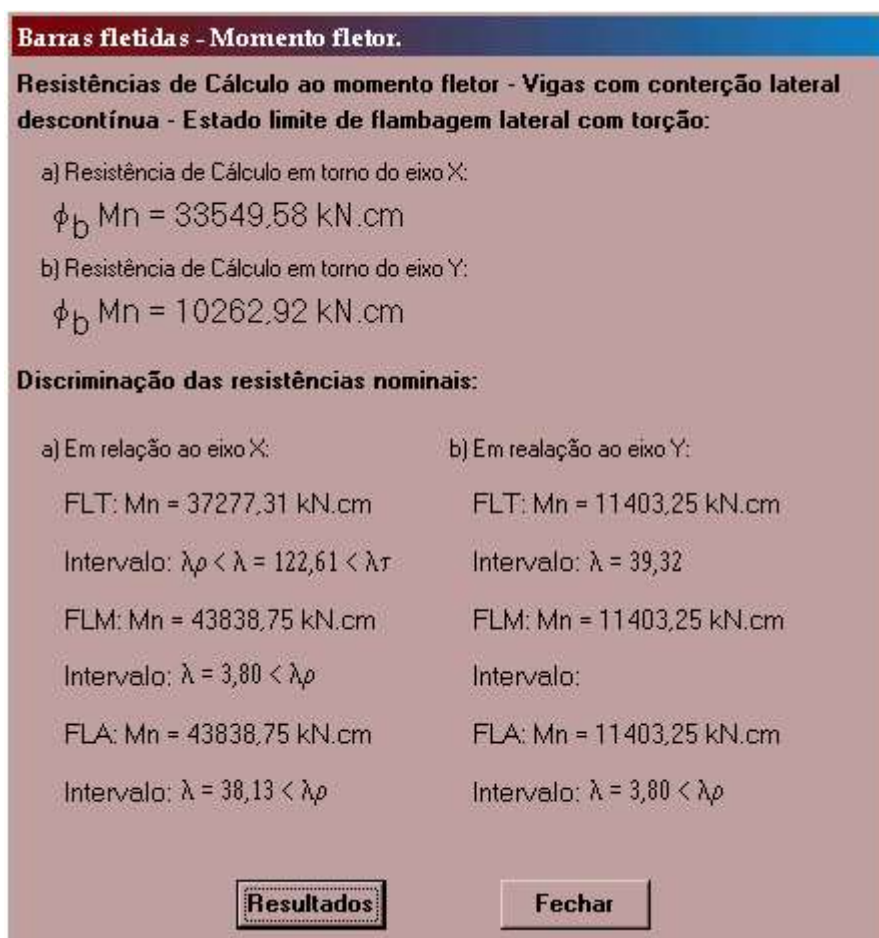


Figura 18. Tela de apresentação dos resultados para o dimensionamento à flexão.

Apresentados os resultados do dimensionamento à flexão, fechando-se a respectiva tela, surgirá a tela para escolha do próximo passo, dada pela figura 9.

4.6. Barras fletidas – Força cortante

Para este item, utilizar-se-á do mesmo exemplo do item anterior, Barras fletidas – Momento fletor. Desta maneira, o único valor aqui pertinente é o espaçamento entre enrijecedores (a) que, para o exemplo, é adotado 200cm.

Cálculo manual:

a) Cálculo da resistência nominal ao cisalhamento

De acordo com o item 5.5, especificamente o item 5.5.2, da NBR 8800, o valor de λ é igual à

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{305}{8} = 38,125$$

e com os valores limites de esbeltez:

$$\frac{a}{h} = \frac{200}{30,5} = 6,56 > 3 \therefore k = 5,34$$

$$\lambda_p = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{f_y}} = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{5,34 \cdot 20500}{25}} = 71,47$$

$$\lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{f_y}} = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{5,34 \cdot 20500}{25}} = 92,64$$

Logo:

$$\lambda < \lambda_p$$

$$A_w = h \cdot t_w = 30,5 \cdot 0,8 = 24,40 \text{ cm}^2$$

$$V_n = V_{pl} = 0,60 \cdot A_w \cdot f_y = 0,60 \cdot 24,40 \cdot 25$$

$$V = 366,00 \text{ kN}$$

b) Resistência de cálculo ao cisalhamento

$$\phi_v \cdot V_n = 0,90 \cdot 366,00 = 329,40 \text{ kN}$$

A resistência de cálculo em relação ao eixo y não será calculada aqui pelo fato de a viga estar sendo solicitada em torno do eixo da maior inércia, ou seja, do eixo x. Será calculada pelo programa, que sempre apresentará as resistências nominais e de cálculo em relação aos dois eixos do perfil escolhido.

Cálculo utilizando o programa:

Inicia-se o processo com a tela principal mostrada na figura 1 onde, selecionando-se o respectivo esforço, surge a tela mostrada na figura 19, para inserção da distância entre enrijecedores. Inserido o valor da distância entre enrijecedores, seleciona-se o perfil em questão e clica-se no botão “Perfil.”, mostrando a tela dada pela Figura 16.

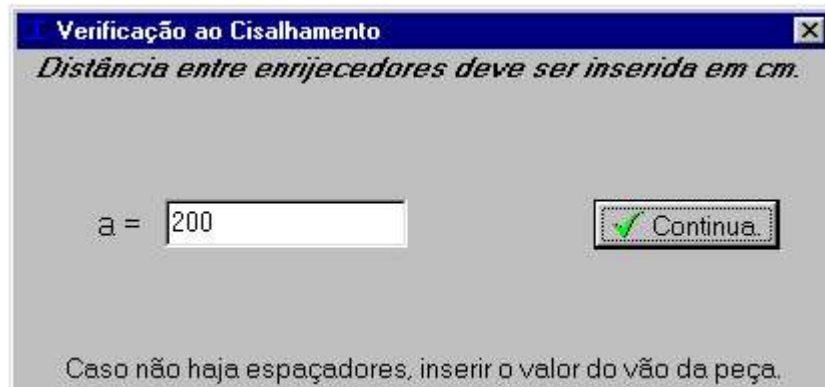


Figura 19. Tela para inserção da distância entre enrijecedores.

Depois de inseridos os valores necessários para o dimensionamento ao esforço cortante, escolhe-se o tipo de aço, igual ao do exemplo anterior, e clica-se no botão “Calcular!”. Será mostrada, então, a tela com os resultados ao esforço cortante da barra (Figura 20), com os intervalos de esbeltez determinados.

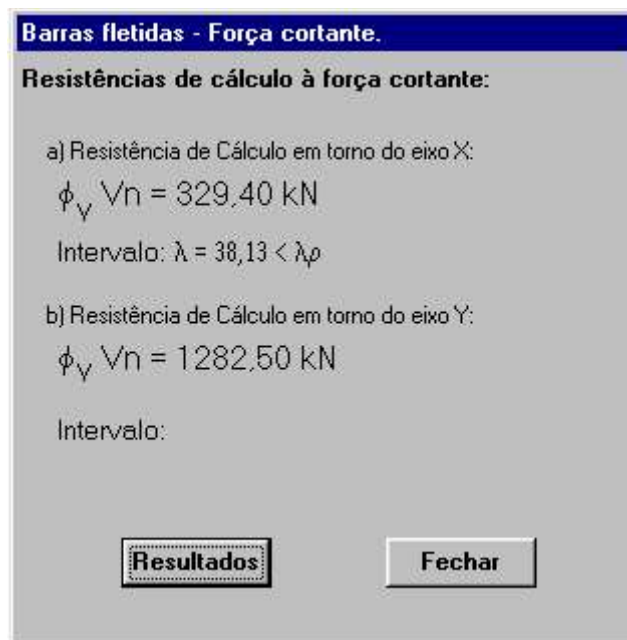


Figura 20. Tela de apresentação dos resultados para o dimensionamento ao esforço cortante.

Concluída a apresentação dos resultados do dimensionamento ao cisalhamento, fechando-se a respectiva tela, surgirá a tela para escolha do próximo passo, dada pela figura 9.

O intervalo para o índice de esbeltez em relação ao eixo y não é mostrado visto que, em relação ao eixo y , não é feito o cálculo de esbeltez, pois a norma indica apenas o cálculo, em perfis “I”, “H”, “U” e caixão, fletidos em relação ao eixo perpendicular à alma. Os demais casos estão incluídos no item 5.5.3 da NBR 8800/86. Deve-se, ainda, observar que o cálculo da resistência nominal para o esforço cortante é feito baseado na análise elástica.

4.7. Barras sujeitas a tensões combinadas

Exemplificando este item, assim como apresentado para os esforços anteriores, apresentando-se primeiramente na forma manual e em seguida através do programa, segue abaixo o enunciado do problema:

Verificar se o perfil CS 400x106 atende às exigências da norma NBR 8800, quando submetido a esforços de compressão e flexão, dados abaixo, considerando o tipo de aço igual ao MR 250. A coluna possui uma altura de 9,0 m, com um ponto de contraventamento lateral na posição de 4,50 m:

- $N_d = -1500 \text{ kN}$ e $M_{dx} = 19400 \text{ kN.cm}$;
- $d = 400 \text{ mm}$;
- $h = 375 \text{ mm}$;
- $bf = 400 \text{ mm}$;
- $t_f = 12,5 \text{ mm}$;
- $t_w = 9,5 \text{ cm}$;
- $A_g = 135,60 \text{ cm}^2$;
- $I_x = 41727 \text{ cm}^4$, $I_y = 13336 \text{ cm}^4$, $r_x = 17,54 \text{ cm}$ e $r_y = 9,92 \text{ cm}$;
- $W_x = 2086 \text{ cm}^3$ e $W_y = 667 \text{ cm}^3$;
- $I_T = 68 \text{ cm}^4$ e $r_T = 10,92 \text{ cm}$;

Obs: Os comprimentos são admitidos, para a compressão e para a flexão, em relação aos eixos de inércia, da seguinte maneira:

Comprimento de flambagem L_x em relação ao eixo x e comprimento sem contenção lateral L_{bx} para FLT em relação ao eixo x :

$$L_{bx} = L_x = 900 \text{ cm}$$

e

comprimento de flambagem L_y em relação ao eixo y e comprimento sem contenção lateral L_{by} para FLT em relação ao eixo y :

$$L_{by} = L_y = 450 \text{ cm}$$

Cálculo manual:

a) Verificação da força normal de compressão

a.1) Cálculo do coeficiente de redução para a flambagem local (Q)

De acordo com a Tabela 1 da NBR 8800, o valor da relação largura/espessura máximo $(b/t)_{\max}$ para a mesa é 16,00 e para a alma é 42,00. Assim,

- mesa (elemento não enrijecido)

$$b_{\text{mesa}} = 20,0 \text{ cm}$$

$$t_{\text{mesa}} = 1,25 \text{ cm}$$

$$\frac{b}{t} = \frac{20}{1,25} = 16 = \left(\frac{b}{t}\right)_{\max} \rightarrow OK! \quad \therefore Q_s = 1,0$$

- alma (elemento enrijecido)

$$b_{\text{alma}} = 37,5 \text{ cm}$$

$$t_{\text{alma}} = 0,95 \text{ cm}$$

$$\frac{b}{t} = \frac{37,5}{0,95} = 39,47 < \left(\frac{b}{t}\right)_{\max} \rightarrow OK!$$

$$\therefore Q_a = 1,0$$

$$\therefore Q = Q_s \cdot Q_a = 1,0$$

a.2) Cálculo do coeficiente de redução para a estabilidade global (ρ)

em relação ao eixo x:

$$r_x = 17,54 \text{ cm}$$
$$\lambda_x = \frac{K_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,0 \cdot 900}{17,54} = 51,31$$
$$\bar{\lambda}_x = \frac{51,31}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 25,0}{20500}} = 0,57$$

em relação ao eixo y:

$$r_y = 9,92 \text{ cm}$$
$$\lambda_y = \frac{K_y \cdot L}{r_y} = \frac{1,0 \cdot 450}{9,92} = 45,36$$
$$\bar{\lambda}_y = \frac{45,36}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 25,0}{20500}} = 0,50$$

De acordo com a Tabela 3 da NBR 8800, tem-se, para o eixo x, a curva b, determinando o valor de $\rho_x = 0,853$ e para o eixo y, a curva c, com valor de $\rho_y = 0,844$.

Portanto, a resistência de cálculo será calculada a partir do menor valor de ρ , ou seja, $\rho_y = 0,844$.

a.3) Resistência de cálculo em relação ao eixo y

sem o valor de ρ (para interação de tensões):

$$N_c = 0,9 \cdot 1,0 \cdot 135,6 \cdot 25,0 = 3051,00 \text{ kN}$$

com o valor de ρ (para interação de estabilidade):

$$N_c = 0,9 \cdot 0,844 \cdot 1,0 \cdot 135,6 \cdot 25,0 = 2575,04 \text{ kN}$$

b) Verificação quanto ao esforço de flexão

b.1) Cálculo da resistência nominal para a flambagem lateral da mesa (FLM)

De acordo com o Anexo D, tabela 27, da NBR 8800, o valor de λ_p é igual à:

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 11$$

e com os valores, para o elemento não enrijecido de:

$$b_f / 2 = 20,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 1,25 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} = \frac{20}{1,25} = 16 > \lambda_p \therefore M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$$

Com Z_x igual a:

$$Z_x = b_f \cdot t_f \cdot (d - t_f) + 0,25 \cdot t_w \cdot (d - 2 \cdot t_f)^2 = 2271,48 \text{ cm}^3$$

portanto,

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 2271,48 \times 25 = 56787 \text{ kN.cm}$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_x = (25 - 11,5) \times 2086 = 28161 \text{ kN.cm}$$

e

$$\lambda_p = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot W_x}{M_r}} = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{20500 \cdot 2086}{28161}} = 24,16$$

Desta maneira,

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} = 56787 - (56787 - 28161) \cdot \frac{16 - 11}{24,16 - 16}$$

$$M_n = 39246,56 \text{ kN.cm}$$

b.2) Cálculo da resistência nominal para a flambagem lateral da alma (FLA)

De acordo com o item 5.6 da NBR 8800, o valor de λ_p é igual a:

$$\lambda_p = 1,47 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,47 \sqrt{\frac{20500}{25}} = 42$$

pois

$$\frac{N_d}{\phi_c N_y} = 0,49 > 0,207$$

e com os valores, para o elemento enrijecido de:

$$h = 37,5 \text{ cm}$$

$$t_w = 0,95 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{37,5}{0,95} = 39,47 < \lambda_p \therefore M_n = M_{pl} = Z_x \cdot f_y$$

Desta maneira,

$$M_n = 56.787 \text{ kN.cm.}$$

b.3) Cálculo da resistência nominal para a flambagem lateral a torção (FLT)

O parâmetro de esbeltez da barra para a flambagem lateral com torção, em relação ao eixo y, é:

$$\lambda = \frac{L_{by}}{r_y} = \frac{450}{9,92} = 45,36$$

De acordo com a tabela 27 da NBR 8800, tem-se:

$$\lambda_p = 1,75 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 50,11$$

Como $\lambda < \lambda_p$, onde é adotado o valor de $C_b = 1,0$:

$$M_{pl} = Z_x \cdot f_y = 2271,48 \times 25 = 56787 \text{ kN.cm}$$

Comparando-se os valores obtidos para M_n considerando os três estados de flambagem (FLM, FLA, FLT), emprega-se o menor valor dentre eles que é:

$$M_n = 39246,56 \text{ kN.cm}$$

b.4) Resistência de cálculo à flexão simples

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9 \cdot 39246,56 = 35321,90 \text{ kN.cm}$$

c) Cálculo da carga de flambagem elástica por flexão para o eixo x

$$N_{ex} = \frac{A_g \cdot f_y}{\lambda^2} = \frac{135,60 \cdot 25}{0,57^2} = 10433,98 \text{ kN}$$

d) Cálculo da equação de interação de tensões

De acordo com o item 5.6.1.3.1:

$$\frac{N_d}{\phi_t \cdot N_n} + \frac{M_{dx}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{dy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1$$

$$\frac{1500}{0,90 \cdot 3051,00} + \frac{19400}{0,90 \cdot 39246,56} + 0,0 \leq 1$$

$$0,961 \leq 1 \rightarrow \text{OK!}$$

e) Cálculo da equação de interação de estabilidade

De acordo como item 5.6.1.3.2:

$$\frac{N_d}{\phi_c \cdot N_n} + \frac{C_{mx} \cdot M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 \cdot N_{ex}}\right) \cdot \phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{C_{my} \cdot M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 \cdot N_{ey}}\right) \cdot \phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1$$

$$\frac{1500}{0,90 \cdot 2575,04} + \frac{1,0 \cdot 19400}{\left(1 - \frac{1500}{0,73 \cdot 10434}\right) \cdot 0,90 \cdot 39246,56} + 0,0 \leq 1$$

$$1,167 > 1$$

Portanto, para este perfil, não foi verificada sua resistência quando solicitada pelos esforços combinados especificados.

Cálculo utilizando o programa:

Inicia-se o processo com a tela principal dada pela figura 1, onde, selecionando-se o respectivo esforço, é mostrada a tela onde é necessário inserir os valores de C_b e os comprimentos sem contenção lateral da viga para flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente, como é mostrada na Figura 15.

Na próxima tela apresentada, devem ser inseridos os valores de comprimento de flambagem e tipo de vinculação, para o efeito de compressão, tanto para o eixo x como para o eixo y, como é mostrada na tela mostrada na figura 5.

Na seqüência, devem ser inseridos pelo usuário os valores dos esforços de cálculo (N_d , M_{dx} , M_{dy}), apresentada na tela mostrada na figura 21.



The image shows a software dialog box with a blue title bar that reads "Esforços solicitantes de cálculo." and a close button (X) in the top right corner. The main area of the dialog is titled "Momentos Fletores de Cálculo" in a bold, italicized font. Below this title, there are three rows of input fields. The first row is labeled "Nd =" and contains the value "1500" in a text box, followed by the unit "kN". The second row is labeled "Mdx =" and contains the value "19400" in a text box, followed by the unit "kN.cm". The third row is labeled "Mdy =" and contains the value "0,0" in a text box, followed by the unit "kN.cm". At the bottom center of the dialog, there is a button with a green checkmark icon and the text "OK!".

Figura 21. Tela para inserção dos valores dos esforços de cálculo.

Os próximos valores a serem inseridos no programa, são os valores de C_{mx} e C_{my} , como solicitado pela tela mostrada na figura 22.

Valores de C_{mx} e C_{my} .

Inserir os valores de C_{mx} e C_{my}

C_{mx} = 1,0 kN

C_{my} = 1,0 kN

OK!

Figura 22. Tela para inserção dos valores de C_{mx} e C_{my} .

Depois de inseridos os valores pertinentes à geometria e à solicitação do problema, deve ser escolhido o perfil, neste caso um perfil “I” soldado, como mostrada na tela dada pela Figura 23.

Dados do Perfil: Perfil "H" ou "I" soldado

Características geométricas do perfil em cm.

d = 40,00 I_t = 68,00

h = 37,50 r_t = 10,92

tw = 0,95 d_0 = 0

bf = 40,00

tf = 1,25

Continuar!

Figura 23. Tela com dimensões e características geométricas do perfil solicitado à flexo-compressão.

Em seguida é mostrada a tela (Figura 24) com os demais valores das características geométricas pertinentes ao restante do cálculo.

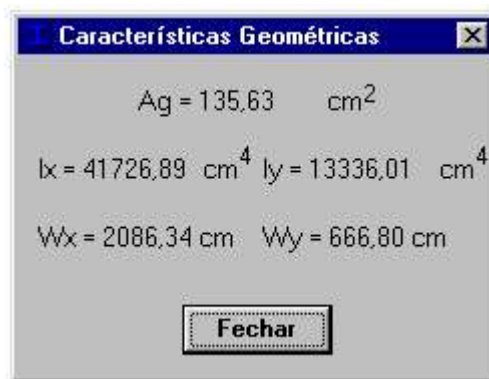


Figura 24. Tela com características geométricas do perfil.

Depois de inseridos os valores necessários para o dimensionamento à flexo-compressão, escolhe-se o tipo de aço, neste exemplo aço MR-250, e clica-se no botão “Calcular!”, será mostrada, então, a tela com os resultados obtidos pelo perfil escolhido (Figura 25).

Nesta tela são também mostrados alguns valores parciais pertinentes para entendimento e orientação do usuário no caso de necessitar ou preferir alterar algum dado.

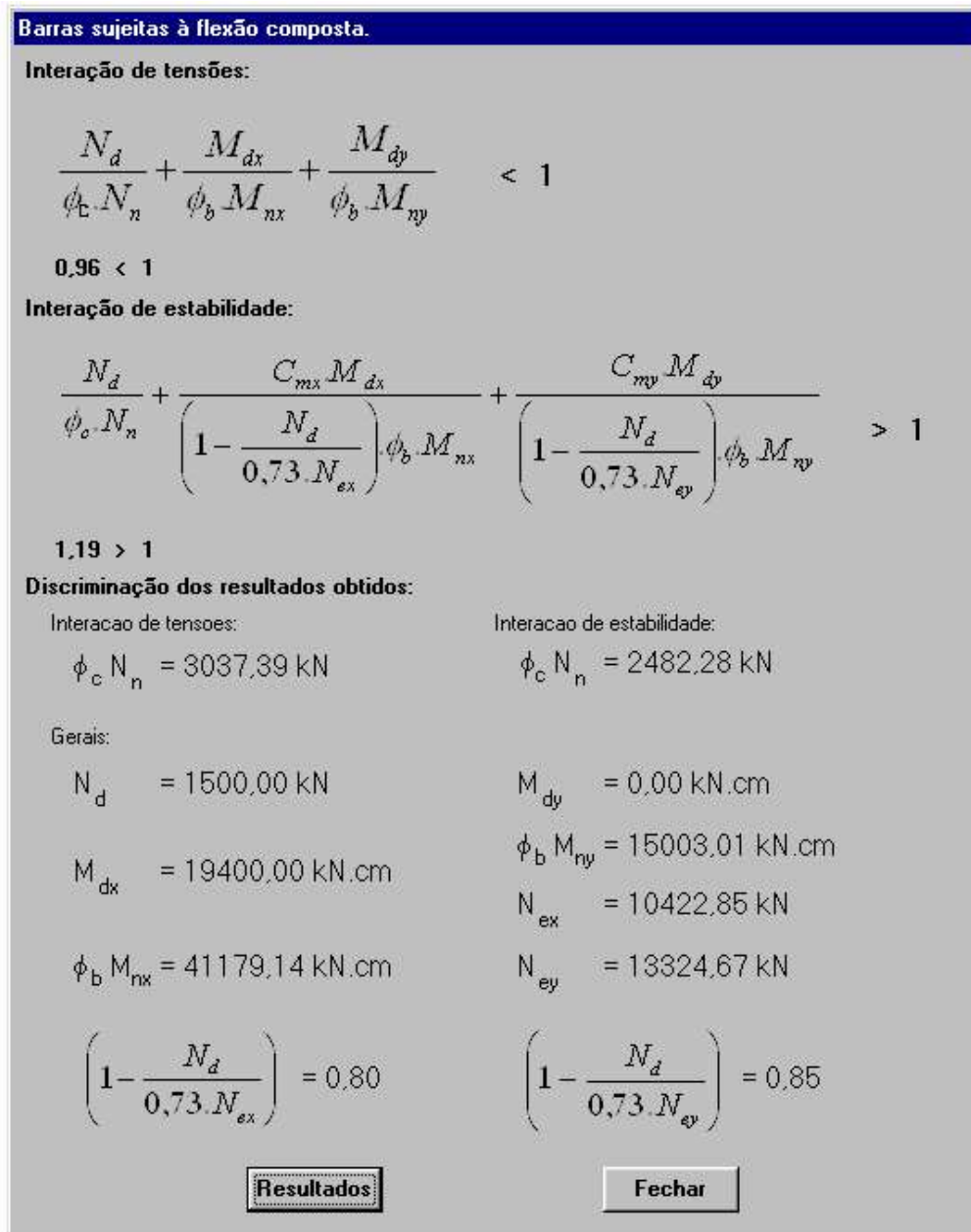


Figura 25. Tela de apresentação dos resultados para o dimensionamento à flexo-compressão.

Após a apresentação dos resultados, fechando-se a respectiva tela, surgirá a tela para escolha do próximo passo, dada pela figura 9. Então o usuário poderá refazer o cálculo escolhendo outro perfil ou alterar apenas as condições do problema. Há ainda a possibilidade de refazer todo o cálculo, a partir do início.

Neste exemplo, ocorrem novamente diferenças nos resultados das resistências de cálculo para os esforços de compressão e de flexão, devidas aos arredondamentos realizados manualmente ou pelo programa, conforme já mencionado anteriormente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme pôde-se observar nos exemplos numéricos, a utilização do aplicativo *Delphi 4.0* permitiu a elaboração de um programa que possibilita ao usuário realizar os cálculos de dimensionamento de maneira simples, rápida e segura.

Tomou-se o cuidado de apresentar uma boa interface com o usuário, procurando orientá-lo no processo de cálculo, avisando-o de alguns pontos críticos que possam surgir neste processo e também dos limites a que a norma impõe às resistências e aos parâmetros envolvidos no cálculo. Nos exemplos numéricos procurou-se mostrar estas informações e como o programa trata cada caso, orientando o usuário para que possa interpretá-los e relevar a sua importância na continuidade do cálculo das resistências.

Considerando-se os procedimentos adotados pelo programa, diferenças aparentes podem surgir nos resultados devidas ao arredondamento feito quando obtidos manualmente ou devidas aos valores tabelados adotados. Sendo assim, o programa torna mais precisa a verificação da resistência de cálculo de perfis dados pela NBR 8800/86.

No cálculo das resistências nominais ao esforço de compressão os procedimentos de cálculo definidos no Anexo J não foram aqui desenvolvidos e incluídos pela falta de tempo hábil para o autor (na época estudante de graduação) do estudo detalhado da teoria e do comportamento de elementos esbeltos, de seção aberta, submetidos a flexo-torção e para a elaboração da unidade computacional correspondente.

Cabe comentar que alguns perfis também não são contemplados neste programa computacional como, por exemplo, perfis monossimétricos e assimétricos para a flexão.

Por fim, salienta-se o acréscimo de conhecimentos e conceitos adquiridos na pesquisa, sendo imprescindível o auxílio constante do orientador, onde foram abordados pontos de decisão no desenvolvimento do programa e discussão de etapas no cálculo das resistências de cálculo.

5. BIBLIOGRAFIA

1. ALVES, A. P. - Programação: codificação, testes, depuração de erros, documentação. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1978.
2. ANDRADE, P. B. - Curso básico de estruturas de aço. Segunda edição revisada, Belo Horizonte: IEA Editora, 1994.
3. ARAUJO, E. C. de - Elementos de aço flexo-comprimidos. São Carlos, 1993. [Dissertação - Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos];
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 21p.;
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 8800 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 200p.;
6. BELLEI, I. H. - Edifícios estruturais em aço - Projeto e cálculo. São Paulo: Editora Pini, 1994.
7. CANTÙ, MARCO - Dominando o Delphi 4 – A Bíblia. São Paulo: Makron Books, 1998.
8. DAVIS, W. S. - Análise e projeto de sistemas; uma abordagem estruturada. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.
9. DIAS, L. A. M. - Edificações de aço no Brasil. São Paulo: Zigurate Editora, 1993.
10. DUCASSÉ, P. - História das técnicas. Lisboa: Publicações Europa-América, 1962.
11. GOMES, O. F. - Análise dos elementos fletidos em estruturas de aço. São Carlos, 1993. [Dissertação - Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos];
12. HOLANDA, S. B. - História geral da civilização brasileira. Rio de Janeiro: Difel, 1977, v. 1.
13. PEVSNER, N. - Origens da arquitetura moderna e do design. Segunda edição, São Paulo: Martins Fontes, 1996.
14. POUNDS, N. J. G. - Geografia do ferro e do aço. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1966.
15. QUEIROZ, G. - Elementos das estruturas de aço. Belo Horizonte: Imprensa Universitária, 1986.
16. RONAN, C. A. - História ilustrada da ciência da Universidade de Cambridge. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, vol. 01, 1987.
17. SALES, J. J. et alii - Elementos de estruturas de aço – Dimensionamento. São Carlos: Imprensa Universitária, 1994.
18. SALES, J. J. et alii - Elementos de estruturas de aço – Dimensionamento. São Carlos: Imprensa Universitária, 1994.

- 19 SILVA, G. G. - Arquitetura do ferro no Brasil. São Paulo: Nobel, 1986.
- .
- 20 SILVA, N. P. - Projeto e desenvolvimento de sistemas. São Paulo: Editora Érica Ltda, 1994.
- 21 VARGAS, M. - História da técnica e da tecnologia no Brasil. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1994.
- .
- 22 YAMAMOTO, W.; OLIVEIRA NETO, L. Dimensionamento de elementos estruturais de aço, segundo a norma brasileira NBR8800/1986, utilizando o aplicativo Delphi 4.0. In: XXII Congresso Ibero-Latino- Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia (XXII CILAMCE). Campinas: UNICAMP, 2001. (ISBN 85-902253-1-3)
- .
- 23 YAMAMOTO, W.; OLIVEIRA NETO, L. Automatização do dimensionamento de elementos estruturais de aço segundo a norma brasileira NBR8800/1986. Revista Construção Meta'lica. São Paulo: ABCEM, edição 69, 2005. p. 21-27. (ISSN 1414-6517)

SUMÁRIO

1.OBJETIVOS.....	1
2.MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO.....	1
2.1.MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES.....	1
2.2.ABNT-NBR 8681 / 84.....	2
2.2.1. Ações.....	2
2.2.2. Estados Limites.....	3
2.2.3. Combinação de ações.....	3
2.3.ABNT- NBR 8800 / 86.....	3
3.DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 8800/86.....	4
3.1.BARRAS TRACIONADAS.....	4
3.2.BARRAS COMPRIMIDAS.....	4
3.3. BARRAS FLETIDAS – MOMENTO FLETOR.....	5
3.4. BARRAS FLETIDAS – FORÇA CORTANTE.....	6
3.5. BARRAS SUJEITAS A TENSÕES COMBINADAS.....	7
4.PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	8
4.1. ESTRUTURA DO DELPHI 4.0.....	8
4.2.FLUXOGRAMAS.....	8
4.3.BARRAS TRACIONADAS.....	8
4.4.BARRAS COMPRIMIDAS.....	16
4.5.BARRAS FLETIDAS – MOMENTO FLETOR.....	22
4.6. BARRAS FLETIDAS – FORÇA CORTANTE.....	28
4.7. BARRAS SUJEITAS A TENSÕES COMBINADAS.....	30
5.BIBLIOGRAFIA.....	41
<i>Constantes físicas do aço.....</i>	<i>ii</i>
Manual do usuário.....	vi

ANEXOS

NOTAÇÕES

Constantes físicas do aço

- $E = 205000$ MPa (Módulo de deformação longitudinal);
- $G = 78925$ MPa (Módulo de deformação transversal, $G = 0,385.E$);
- $\nu \cong 0,3$ (Coeficiente de Poisson e $\nu \cong 0,5$ quando se encontra no regime plástico);
- $\gamma = 7850$ Kgf / m³ ≈ 77 KN / m³ (peso específico);
- $\beta = 12,0.10^{-6}$ / °C (coeficiente de dilatação térmica).

a) Letras romanas maiúsculas:

A	- Área da seção transversal
A_c	- Área da mesa comprimida
A_e	- Área líquida efetiva, com $A_e = C_t.N_a$, onde os valores de C_t podem ser obtidos no item 5.1.1.3 da NBR 8800/86
A_{ef}	- Área efetiva
A_f	- Área da mesa
A_g	- Área bruta
A_n	- Área líquida, com $A_n = A_g - \Sigma(A_{parafuso})$
A_t	- Área da mesa tracionada
A_w	- Área líquida efetiva de cisalhamento
C_b, C_m	- Coeficientes utilizados no dimensionamento à flexão simples ou composta
C_{mx}, C_{my}	- Coeficientes “ C_m ” relativos aos eixos “x” e “y”, respectivamente
C_{pg}	- Parâmetro utilizado no cálculo de vigas esbeltas
C_t	- Coeficiente de redução usado no cálculo da área líquida efetiva
C_t	- Constante de empenamento da seção transversal [L] ⁶
D	- Diâmetro externo de elementos tubulares de seção circular
E	- Módulo de elasticidade do aço, $E = 205000$ MPa
G	- Módulo de elasticidade transversal do aço, $G = 0,385.E$
H	- Parâmetro utilizado na flambagem por flexo-torção
I_T	- Momento de inércia à torção
I_x, I_y	- Momentos de inércia em relação aos eixos “x” e “y”, respectivamente
K_x, K_y	- Parâmetros utilizados no cálculo do comprimento de flambagem segundo os eixos “x” e “y”, respectivamente
K_z	- Parâmetro utilizado no cálculo do comprimento de flambagem por torção
L	- Comprimento em geral, vão
L_b	- Comprimento do trecho sem contenção lateral
L_p, L_{pd}	- Valor limite do comprimento de um trecho sem contenção lateral, correspondente ao momento de plastificação, sem e com redistribuição posterior de momentos, respectivamente

L_r	- Valor do comprimento de um trecho sem contenção lateral, correspondente ao momento " M_r "
M	- Momento fletor
M_{cr}	- Momento crítico
M_d	- Momento fletor de cálculo
M_{dx}, M_{dy}	- Momentos fletores de cálculo segundo os eixos "x" e "y", respectivamente
M_n	- Resistência nominal ao momento fletor
M_{pl}	- Momento de plastificação
M_r	- Momento fletor correspondente ao início de escoamento incluído ou não o efeito de tensões residuais
M_y	- Momento correspondente ao início de escoamento
N	- Força normal em geral
N_d	- Força normal de cálculo
N_{ex}, N_{ey}	- Cargas de flambagem elástica por flexão em torno dos eixos "x" e "y", respectivamente
N_n	- Resistência nominal à força normal
N_y	- Força normal de escoamento da seção = $A_g \cdot f_y$
Q	- Coeficiente de redução que leva em conta a flambagem local
Q_a	- Relação entre a área efetiva e a área bruta da seção da barra
Q_s	- Fator de redução usado no cálculo de elementos esbeltos comprimidos não enrijecidos
R	- Resistência em geral
R_n	- Resistência nominal
S_d	- Solicitação de cálculo
V	- Força cortante
V_d	- Força cortante de cálculo
V_n	- Resistência nominal à força cortante
V_{pl}	- Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento
W	- Módulo de resistência elástico
W_{ef}	- Módulo de resistência efetivo, elástico
W_x, W_y	- Módulos de resistência elásticos em relação aos eixos "x" e "y", respectivamente
Z	- Módulo de resistência plástico
Z_x, Z_y	- Módulos de resistência plásticos referentes aos eixos "x" e "y", respectivamente

b) Letras romanas minúsculas

a	- Distância em geral, distância entre enrijecedores transversais, altura da região comprimida em lajes de vigas mistas
b	- Largura em geral
b_{ef}	- Largura efetiva
b_f	- Largura da mesa
d	- Diâmetro em geral, altura da seção
f	- Tensão em geral
f_1, f_2	- Tensões utilizadas no cálculo do momento crítico " M_{cr} " em perfis "I" e "H"

f_{dn}, f_{dv}	- Tensão normal e tensão de cisalhamento, respectivamente, correspondente a solicitações de cálculo
f_{ex}, f_{ey}, f_{ez}	- Tensões críticas de flambagem elástica segundo os eixos "x", "y" e "z", respectivamente
f_r	- Tensão residual, a ser considerada igual a 115MPa
f_u	- Limite de resistência à tração do aço
f_y	- Limite de escoamento do aço
h	- Altura em geral, distância entre as faces internas das mesas de perfis "I" e "H"
k	- Coeficiente de flambagem
k_{pg}	- Parâmetro utilizado no dimensionamento de vigas esbeltas
l	- Comprimento
r	- Raio de giração, raio
r_T	- Raio de giração de seção formada pela mesa comprimida mais 1/3 da região comprimida da alma, calculado em relação ao eixo situado no plano médio da alma
r_x, r_y	- Raios de giração em relação aos eixos "x" e "y", respectivamente
t	- Espessura em geral
t_f	- Espessura da mesa
t_w	- Espessura da alma

c) Letras gregas maiúsculas

Δ	- Deslocamento horizontal no topo de um pilar, incremento, flecha
$\Delta\sigma$	- Faixa de variação de tensões normais
$\Delta\tau$	- Faixa de variação de tensões de cisalhamento
Σ	- Somatório

d) Letras gregas minúsculas

α, β	- Coeficientes
γ	- Coeficiente de ponderação das ações
γ_a	- Peso específico do aço
λ	- Parâmetro de esbeltez
λ	- Parâmetro de esbeltez para barras comprimidas
λ_p	- Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
λ_r	- Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento, com ou sem tensão residual
ν_a	- Coeficiente de Poisson para o aço estrutural, no domínio elástico, tomado igual a 0,3
ρ_x, ρ_y	- Coeficientes que levam em conta a estabilidade global em perfis comprimidos, segundo os eixos "x" e "y", respectivamente
σ	- Tensão normal
τ	- Tensão de cisalhamento
ϕ	- Coeficiente de resistência em geral
ϕ_b	- Coeficiente de resistência ao momento fletor
ϕ_c	- Coeficiente de resistência na compressão
ϕ_t	- Coeficiente de resistência na tração

ϕ_v - Coeficiente de resistência à força cortante

e) Índices gerais

a - Aço
b - Flexão
c - Compressão
d - De cálculo
e - Elástico
f - Mesa
g - Bruta, viga
i - Número de ordem
n - Líquida, normal, nominal
p - Plastificação
r - Residual
y - Escoamento
w - Alma de perfis

f) Índices compostos

cr - Crítico
dx, dy - De cálculo, segundo os eixos "x" e "y", respectivamente
ef - Efetivo
ex, ey - Flambagem elástica, segundo os eixos "x" e "y", respectivamente
min - Mínimo
pl - Plástico, plastificação
red - Redução, reduzido

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CAMPUS DE BAURU

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Manual do usuário

PROGRAMA COMPUTACIONAL - METÁLICA

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DE ELEMENTOS

ESTRUTURAIS EM AÇO, SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA

NBR8800/1986

WELLINGTON YAMAMOTO, engenheiro civil (*in memoriam*)

LUTTGARDES DE OLIVEIRA NETO, engenheiro civil e professor doutor