ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 / 28º andar
CEP 20003-900 – Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro – RJ
Tel.: PABX (21) 210-3122
Fax: (21) 220-1762/220-6436
Endereço eletrônico:
www.abnt.org.br

Copyright © 2001,
ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas
Printed in Brazil/
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

NOV 2001 | **NBR 14762**

Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento

Origem: Projeto 02:125.01-001:2000
ABNT/CB-02 - Comitê Brasileiro da Construção Civil
CE-02:125.01 - Comissão de Estudo de Projeto e Execução de Estruturas Metálicas
NBR 14762 - Cold formed steel design - Procedure
Descriptors: Formed. Steel profile. Structure. Design
Esta Norma cancela e substitui a NB-143:1967
Válida a partir de 31.12.2001

Palavras-chave: Estrutura. Aço. Perfil. Projeto | 53 páginas

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Sumário

Prefácio
Introdução
1 Objetivo
2 Referências normativas
3 Definições, símbolos e unidades
4 Materiais
5 Ações e combinações de ações
6 Análise estrutural e dimensionamento
7 Requisitos para o dimensionamento de barras
8 Requisitos para o dimensionamento de ligações
9 Dimensionamento com base em ensaios
ANEXOS
A Deslocamentos limites
B Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio
C Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedores de borda e enrijecedores intermediários, ou elementos com mais de um enrijecedor intermediário
D Flambagem por distorção da seção transversal
E Barras sujeitas a forças concentradas sem enrijecedores transversais
F Barras com painel conectado à mesa tracionada

Prefácio

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - é o Fórum Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB) e dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros).

Os Projetos de Norma Brasileira, elaborados no âmbito dos ABNT/CB e ABNT/ONS, circulam para Consulta Pública entre os associados da ABNT e demais interessados.

Esta Norma cancela e substitui a NB-143:1967.

Esta Norma contém os anexos de A a E, de caráter normativo, e o anexo F, de caráter informativo.

Introdução

Esta Norma foi elaborada a partir de um trabalho realizado por um grupo de Engenheiros pertencentes às seguintes instituições: Escola de Engenharia de São Carlos e Escola Politécnica, ambas da Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista e Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.

Os projetistas, fabricantes e clientes de estruturas leves, devido à obsolescência da NB-143:1967, têm empregado normas estrangeiras para o desenvolvimento de projetos estruturais em perfis de aço formados a frio, o que tem acarretado algumas incompatibilidades com outras normas brasileiras de caráter mais geral, como por exemplo a NBR 8681:1984 - "Ações e segurança nas estruturas - Procedimento".

Esta Norma, elaborada com base em informações técnicas e requisitos atualizados apresentados pelas mais conceituadas e difundidas normas estrangeiras sobre o tema, incorpora também aspectos particulares da realidade brasileira e apresenta compatibilidade de termos, notação e coeficientes de ponderação das ações e das resistências com as demais Normas Brasileiras sobre projeto estrutural, que estão em processo de revisão ou foram recentemente revisadas.

1 Objetivo

Esta Norma, com base no método dos estados limites, estabelece os princípios gerais para o dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, com espessura máxima igual a 8 mm, conectados por parafusos ou soldas e destinados a estruturas de edifícios.

Esta Norma também pode ser empregada para o dimensionamento de outras estruturas, além de edifícios, desde que sejam consideradas as particularidades de cada tipo de estrutura, como, por exemplo, os efeitos de ações dinâmicas.

O dimensionamento da estrutura com base nas exigências desta Norma deve seguir coerentemente todos os seus critérios, não sendo aceitável o uso simultâneo com o método das tensões admissíveis.

2 Referências normativas

As normas relacionadas a seguir contêm disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para esta Norma. As edições indicadas estavam em vigor no momento desta publicação. Como toda norma está sujeita a revisão, recomenda-se àqueles que realizam acordos com base nesta que verifiquem a conveniência de se usarem as edições mais recentes das normas citadas a seguir. A ABNT possui a informação das normas em vigor em um dado momento.

NBR 6120:1980 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - Procedimento

NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações - Procedimento

NBR 7188:1984 - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre - Procedimento

NBR 8681:1984 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento

NBR 8800:1986 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites) - Procedimento

ISO 898-1:1999 - Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - part 1: bolts, screws and studs

ISO 7411:1984 - Hexagon bolts for high-strength structural bolting with large width across flats - product grade C - property classes 8.8 and 10.9

ASTM A307:2000 - Standard specification for carbon steel bolts and studs, 60,000 PSI tensile strength

ASTM A325:2000 - Standard specification for structural bolts, steel, heat-treated, 120/105 ksi minimum tensile strength

ASTM A354:2000 (Grade BD) - Standard specification for quenched and tempered alloy steel bolts, studs, and other externally threaded fasteners

ASTM A370:1997 - Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products

ASTM A394:2000 - Standard specification for steel transmission tower bolts, zinc-coated and bare

ASTM A449:2000 - Standard specification for quenched and tempered steel bolts and studs

ASTM A490:2000 - Standard specification for heat-treated steel structural bolts, 150 ksi minimum tensile strength

AWS A5.1:1991 - Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding

AWS A5.5:1996 - Specification for low-alloy steel electrodes for shielded metal arc welding

AWS A5.17:1997 - Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding

AWS A5.18:1993 - Specification for carbon steel filler metals for gas shielded arc welding

AWS A5.20:1995 - Specification for carbon steel electrodes for flux cored arc welding

AWS A5.23:1997 - Specification for low-alloy steel electrodes and fluxes for submerged arc welding

AWS A5.28:1996 - Specification for low-alloy steel electrodes for gas shielded arc welding

AWS A5.29:1998 - Specification for low-alloy steel electrodes for flux cored arc welding

AWS D1.1:2000 - Structural welding code - steel

AWS D1.3:1998 - Structural welding code - sheet steel

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

3 Definições, símbolos e unidades

3.1 Definições

Para os efeitos desta Norma, aplicam-se as seguintes definições:

3.1.1 projeto: Conjunto de cálculos (dimensionamento), desenhos, especificações de fabricação e de montagem da estrutura. O dimensionamento deve obedecer às prescrições desta Norma e os desenhos e especificações de fabricação e de montagem da estrutura devem obedecer às condições estabelecidas na NBR 8800.

3.1.2 aço virgem: Aço recebido do produtor ou distribuidor antes das operações de formação a frio.

3.1.3 aço com qualificação estrutural: Aço produzido com base em especificação que o classifica como estrutural e estabelece a composição química e as propriedades mecânicas.

3.1.4 aço sem qualificação estrutural: Aço produzido com base em especificação que estabelece apenas a composição química.

3.1.5 perfil estrutural de aço formado a frio: Perfil obtido por dobramento, em prensa dobradeira, de lâminas recortadas de chapas ou tiras, ou por perfilagem, em mesa de roletes, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente.

3.1.6 elemento: Parte constituinte de um perfil formado a frio: mesa, alma, enrijecedor, etc.

3.1.7 elemento com bordas vinculadas [elemento AA]: Elemento plano com as duas bordas vinculadas a outros elementos na direção longitudinal do perfil (ver figura 1).

3.1.8 elemento com borda livre [elemento AL]: Elemento plano vinculado a outro elemento em apenas uma borda na direção longitudinal do perfil (ver figura 1).

3.1.9 enrijecedor de borda simples: Enrijecedor de borda constituído por um único elemento plano (ver figura 1).

3.1.10 elemento com enrijecedor(es) intermediário(s): Elemento enrijecido entre as bordas longitudinais por meio de enrijecedor(es) intermediário(s) paralelo(s) à direção longitudinal do perfil (ver figura 1).

3.1.11 subelemento: Parte compreendida entre enrijecedores intermediários adjacentes, ou entre a borda e o enrijecedor intermediário adjacente (ver figura 1).

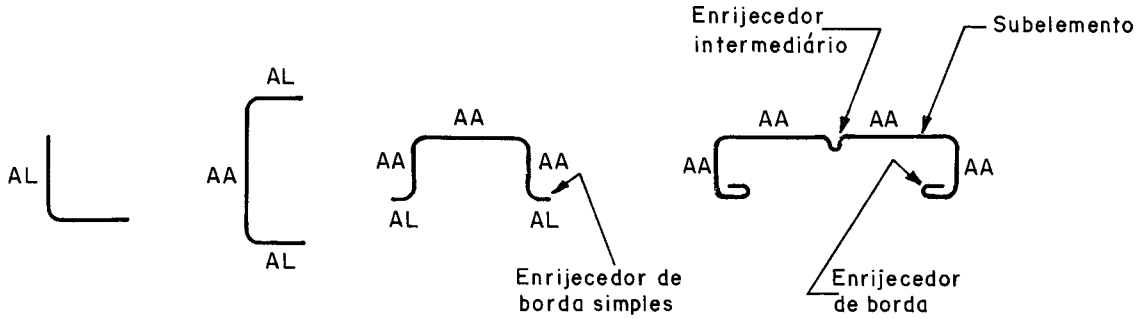
3.1.12 espessura: Espessura da chapa de aço, excluindo revestimentos.

3.1.13 largura nominal do elemento: Largura total do elemento, incluindo as regiões de dobra, medida no plano da seção transversal e empregada para designação do perfil.

3.1.14 largura do elemento [largura]: Largura da parte plana de um elemento, medida no plano da seção transversal.

3.1.15 largura efetiva: Largura de um elemento reduzida para efeito de projeto, devida à flambagem local.

3.1.16 relação largura-espessura: Relação entre a parte plana de um elemento e sua espessura.



AA - Elemento com bordas vinculadas

AL - Elemento com borda livre

Figura 1 - Ilustração dos tipos de elementos componentes de perfis formados a frio

3.2 Símbolos

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

3.2.1 Letras romanas maiúsculas

A - área bruta da seção transversal da barra

- área estabelecida para cálculo de enrijecedores transversais

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

A_d - área bruta da mesa comprimida e do respectivo enrijecedor de borda

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

- área efetiva do enrijecedor intermediário ou de borda

A_{eq} - área da seção transversal da barra comprimida equivalente

A_{gt} - área bruta sujeita à tração na verificação da ruptura por rasgamento

A_{gv} - área bruta sujeita a cisalhamento na verificação da ruptura por rasgamento

A_n - área líquida da seção transversal da barra

A_{nt} - área líquida sujeita à tração na verificação da ruptura por rasgamento

A_{nv} - área líquida sujeita a cisalhamento na verificação da ruptura por rasgamento

A_p - área bruta da seção transversal do parafuso

A_s - área reduzida do enrijecedor intermediário ou de borda

- área da seção transversal do enrijecedor de alma

A_{st} - área da seção do enrijecedor de borda ou intermediário, excluindo qualquer parte de elementos adjacentes

A_o - área empregada no cálculo da área efetiva de tubos com seção transversal circular

B_c - parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras f_{yc}

C - parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento modificada f_{ya}

C_b - coeficiente de equivalência de momentos na flexão

C_m - coeficiente de equivalência de momentos na flexão composta

C_{mx} - valor de C_m para flexão em relação ao eixo principal x

C_{my} - valor de C_m para flexão em relação ao eixo principal y

C_p - fator de correção

C_t - coeficiente de redução da área líquida

C_w - constante de empenamento da seção

C_1 a C_9 - coeficientes empregados no cálculo da força resistente de cálculo F_{Rd} em almas sem enrijecedores transversais

C_θ - coeficiente empregado no cálculo da força resistente de cálculo F_{Rd} em almas sem enrijecedores transversais

D - largura nominal do enrijecedor de borda

- diâmetro externo do tubo

E - módulo de elasticidade do aço (205 000 MPa)

F_G - ação permanente

F_Q - ação variável

$F_{Q,exc}$ - ação excepcional

F_{Rd} - força resistente de cálculo, em geral

F_{Sd} - força solicitante de cálculo, em geral

F_x - força transversal ao elemento sujeito à flambagem por distorção

G - módulo de elasticidade transversal do aço (0,385E = 78 925 MPa)

H - altura total do pilar (distância do topo à base)

I_a - momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário ou de borda

I_{eq} - momento de inércia da seção transversal da barra comprimida equivalente

I_{min} - momento de inércia mínimo do enrijecedor intermediário

I_s - momento de inércia da seção bruta do enrijecedor, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido. Para enrijecedor de borda, a parte curva entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

$I_{s,min}$ - momento de inércia mínimo do enrijecedor em relação ao plano médio da alma

I_{sf} - momento de inércia da seção bruta do elemento com enrijecedores intermediários (incluindo os enrijecedores intermediários) em relação ao seu próprio eixo principal

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

I_{xy} - produto de inércia da seção em relação ao sistema de coordenadas *xy*

I_t - momento de inércia à torção uniforme

K_xL_x - comprimento efetivo de flambagem da barra em relação ao eixo *x*

K_yL_y - comprimento efetivo de flambagem da barra em relação ao eixo *y*

K_tL_t - comprimento efetivo de flambagem da barra por torção

L - comprimento de referência empregado no cálculo do efeito *shear lag*

- distância entre pontos travados lateralmente da barra
- comprimento da barra
- comprimento do cordão de solda
- vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço
- comprimento sem contenção transversal do elemento sujeito à distorção

L_d - comprimento da meia onda longitudinal associada à tensão convencional de flambagem elástica por distorção

L_0 - comprimento de referência empregado no cálculo da tensão convencional de flambagem elástica por distorção

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

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

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

M_{dist} - momento fletor de flambagem por distorção

M_e - momento fletor de flambagem elástica

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

M_{Rd} - momento fletor resistente de cálculo

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

M_{Sd} - momento fletor solicitante de cálculo

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

$M_{xt,Rd}$; $M_{yt,Rd}$ - momentos fletores resistentes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos *x* e *y*, respectivamente, calculados com base no escoamento da fibra tracionada da seção bruta

$M_{0,Rd}$ - momento fletor resistente de cálculo, obtido com base no início de escoamento da seção efetiva, conforme 7.8.1.1

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

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

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

N_{cr} - força normal crítica de flambagem elástica por distorção

N_e - força normal de flambagem elástica

- força normal empregada no cálculo da tensão convencional de flambagem elástica por distorção

N_{ex}; N_{ey} - forças normais de flambagem elástica por flexão em relação aos eixos *x* e *y*, respectivamente

N_{et} - força normal de flambagem elástica por torção

N_{ext} - força normal de flambagem elástica por flexo-torção

$N_{s,Rd}$ - força normal de compressão resistente de cálculo do enrijecedor de alma

$N_{t,Rd}$ - força normal de tração resistente de cálculo

$N_{t,Sd}$ - força normal de tração solicitante de cálculo

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

$S_{d,uti}$ - valor do efeito estrutural, calculado com base nas combinações apropriadas de ações para os estados limites de utilização

S_{lim} - valor fixado para o efeito estrutural que determina o aparecimento do estado limite de utilização considerado

$N_{0,Rd}$ - força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 7.7, admitindo $\rho = 1,0$

V_{Rd} - força cortante resistente de cálculo

V_{Sd} - força cortante solicitante de cálculo

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

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

W_{ef} - módulo de resistência elástico da seção efetiva referente ao início de escoamento da seção efetiva

W_{xt}; W_{yt} - módulos de resistência elásticos da seção bruta em relação aos eixos *x* e *y*, respectivamente, referentes à fibra tracionada

X_f - valor médio do fator fabricação

X_m - valor médio do fator material

3.2.2 Letras romanas minúsculas

a - distância entre enrijecedores transversais de alma

b - largura do elemento; dimensão plana do elemento sem incluir dobras

b_c - largura do trecho comprimido de elementos sob gradiente de tensões normais, conforme indicada nas tabelas 4 e 5

b_{ef} - largura efetiva

$b_{ef,1}$; $b_{ef,2}$ - larguras efetivas indicadas na tabela 4 e na figura 3

$b_{ef,r}$ - largura efetiva reduzida do subelemento

b_f - largura de referência empregada no cálculo do efeito *shear lag*

- largura nominal da mesa ou do conjunto mesa-enrijecedores de borda

b_t - largura do trecho tracionado de elementos sob gradiente de tensões normais, conforme indicada nas tabelas 4 e 5

b_w - largura nominal da alma

b_o - largura de um elemento com enrijecedor(es) intermediário(s)

c - comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicada

d - largura do enrijecedor de borda

- diâmetro nominal do parafuso

- altura da seção

d_c - distância entre o eixo neutro e a fibra extrema comprimida da seção

d_{ef} - largura efetiva do enrijecedor de borda

d_s - largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda

d_t - distância entre o eixo neutro e a fibra extrema tracionada da seção

d_x - deslocamento do centróide da barra comprimida equivalente na direção da força F_x

d_1 - deslocamento referente à combinação de todas as ações

d_2 - deslocamento referente à combinação das ações variáveis

e - distância, na direção da força, do centro do furo padrão à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade da parte conectada

- base do logaritmo natural, igual a 2,718

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

f_u - resistência à ruptura do aço na tração

f_{up} - resistência à ruptura do parafuso na tração

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

f_w - resistência à ruptura da solda

f_y - resistência ao escoamento do aço

f_{ya} - resistência ao escoamento do aço modificada, considerando o trabalho a frio

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

f_{yf} - resistência ao escoamento do aço, média, para as partes planas do perfil

g - espaçamento dos parafusos na direção perpendicular à solicitação

- distância entre os parafusos ou soldas na direção perpendicular ao eixo da barra

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

- dimensão do enrijecedor em ligações com solda de filete em superfície curva

- altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos)

- distância entre a fibra extrema tracionada da seção e o centróide da seção da barra comprimida equivalente

h_x; h_y - coordenadas x e y, respectivamente, do apoio da seção constituída pela mesa e enrijecedor de borda em relação ao seu centróide (ver figuras D.1 e D.2)

k - coeficiente de flambagem local

k_a - parâmetro empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local k de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda

k_v - coeficiente de flambagem local por cisalhamento

k_x - constante de rigidez à flexão do elemento sujeito à distorção

k_ϕ - constante de rigidez à rotação empregada no cálculo da tensão convencional de flambagem elástica por distorção

m - distância entre o centro de torção e o plano médio da alma em perfil U

- parâmetro empregado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras f_{yc}

- grau de liberdade

n - número de ensaios

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

r - raio de giração da seção bruta

r_e - raio externo de dobramento

r_i - raio interno de dobramento

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

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

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

s - espaçamento dos parafusos na direção da solicitação

- espaçamento dos parafusos ou soldas, na direção do eixo da barra, em barras com seção I compostas por dois perfis U, submetidas à flexão

t - espessura da chapa ou do elemento

- menor espessura da parte conectada

t_{ef} - dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de penetração ou de filete

t_{eq} - espessura equivalente do elemento com enrijecedores intermediários

t_s - espessura do enrijecedor transversal

w_1; w_2 - pernas do filete de solda em superfícies planas

x_0 - coordenada do centro de torção, na direção do eixo x, em relação ao centróide

y_c - distância entre o eixo neutro da seção bruta e o centróide da barra comprimida equivalente

y_{eq} - altura da seção transversal da barra comprimida equivalente

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

y_0 - coordenada do centro de torção, na direção do eixo y, em relação ao centróide

- distância entre o centróide da seção transversal da barra comprimida equivalente e o seu centro de torção

3.2.3 Letras gregas minúsculas

α - fator de imperfeição inicial

α_1; α_2; α_3 - parâmetros empregados no cálculo da tensão convencional de flambagem elástica por distorção

β - parâmetro empregado no cálculo do fator de redução associado à flambagem ρ

β_0 - índice de confiabilidade alvo

β_1 a β_4 - parâmetros empregados no cálculo da tensão convencional de flambagem elástica por distorção

δ_f - coeficiente de variação do fator fabricação

δ_m - coeficiente de variação do fator material

δ_t - coeficiente de variação obtido em ensaios

γ - coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral

γ_g; γ_q - coeficientes de ponderação das ações permanentes e variáveis, respectivamente

η - parâmetro empregado no cálculo da tensão convencional de flambagem elástica por distorção

λ_{dist} - índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção

λ_{eq} - índice de esbeltez da barra comprimida equivalente

λ_p - índice de esbeltez reduzido do elemento

λ_{pd} - índice de esbeltez reduzido do elemento calculado com a tensão σ_n

λ_{p0} - valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento

λ_0 - índice de esbeltez reduzido da barra

μ; μ_0 - parâmetros empregados no cálculo de N_{cr}

ν - coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3

θ - ângulo entre o plano da mesa e o plano do enrijecedor de borda simples

- ângulo entre o plano da alma e o plano da superfície de apoio

ρ - fator de redução associado à flambagem da barra

ρ_{FLT} - fator de redução associado à flambagem lateral com torção da barra

σ - tensão normal, em geral

σ_{dist} - tensão convencional de flambagem elástica por distorção

σ_n - tensão normal de compressão calculada com base nas combinações de ações para os estados limites de utilização

Ψ - relação σ_2/σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local k

ψ_0 - fator de combinação para as combinações últimas das ações

$\psi_{0,ef}$ - fator de combinação efetivo para as combinações últimas das ações

ψ_1; ψ_2 - fatores de utilização para as combinações de utilização das ações

3.3 Unidades

As expressões apresentadas nesta Norma são todas adimensionais, portanto devem ser empregadas grandezas com unidades coerentes, salvo onde explicitamente indicado.

4 Materiais

4.1 Aços para perfis

Esta Norma recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

maior ou igual a 1,08 e o alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370.

4.2 Aços sem qualificação estrutural para perfis

A utilização de aços sem qualificação estrutural para perfis é tolerada se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio.

Não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa e 300 MPa para a resistência ao escoamento f_y e a resistência à ruptura f_u, respectivamente.

4.3 Parafusos

Esta Norma recomenda o uso de parafusos de aço com qualificação estrutural, comuns ou de alta resistência.

4.4 Parafusos de aço sem qualificação estrutural

A utilização de parafusos de aço sem qualificação estrutural é tolerada desde que não seja adotado no projeto valor superior a 300 MPa para a resistência à ruptura do parafuso na tração f_{up}.

4.5 Eletrodos, arames e fluxos para soldagem

Os eletrodos, arames e fluxos para soldagem devem estar de acordo com as exigências das especificações AWS A5.1, AWS A5.5, AWS A5.17, AWS A5.18, AWS A5.20, AWS A5.23, AWS 5.28 e AWS A5.29, onde aplicável.

5 Ações e combinações de ações

5.1 Valores nominais e classificação

As ações a serem adotadas no projeto das estruturas e seus componentes são as estabelecidas pelas NBR 6120, NBR 6123, NBR 7188 ou por outras normas aplicáveis. Estas ações devem ser tomadas como nominais e para o estabelecimento das regras de combinação das ações, estas devem ser classificadas segundo sua variabilidade no tempo, conforme a NBR 8681, em três categorias exemplificadas a seguir:

- F_G: ações permanentes - peso próprio da estrutura e peso de todos os elementos componentes da construção, tais como pisos, telhas, paredes permanentes, revestimentos e acabamentos, instalações e equipamentos fixos, etc.;

- F_Q: ações variáveis - sobrecargas decorrentes do uso e ocupação da edificação, equipamentos, divisórias, móveis, sobrecargas em coberturas, pressão hidrostática, empuxo de terra, vento, variação de temperatura, etc.;

- $F_{Q,exc}$: ações excepcionais - incêndios, explosões, choques de veículos, efeitos sísmicos, etc.

5.2 Combinações de ações para os estados limites últimos

As combinações de ações para os estados limites últimos são as seguintes:

a) combinações últimas normais:

$$\sum_{i=1}^{m}(\gamma_{gi}F_{Gi})+\gamma_{q1}F_{Q1}+\sum_{j=2}^{n}(\gamma_{qj}\psi_{0j}F_{Qj})$$

b) combinações últimas especiais ou de construção:

$$\sum_{i=1}^{m}(\gamma_{gi}F_{Gi})+\gamma_{q1}F_{Q1}+\sum_{j=2}^{n}(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef}F_{Qj})$$

c) combinações últimas excepcionais:

$$\sum_{i=1}^{m}(\gamma_{gi}F_{Gi})+F_{Q,exc}+\sum_{j=1}^{n}(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef}F_{Qj})$$

Onde:

F_{Gi} representa as ações permanentes;

F_{Q1} é a ação variável considerada como principal nas combinações normais, ou como principal para a situação transitória nas combinações especiais ou de construção;

F_{Qj} representa as demais ações variáveis;

$F_{Q,exc}$ é a ação excepcional;

γ_g é o coeficiente de ponderação das ações permanentes, conforme tabela 1;

γ_q é o coeficiente de ponderação das ações variáveis, conforme tabela 1;

ψ_0 é o fator de combinação, conforme tabela 2;

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

$\psi_{0,ef}$ é o fator de combinação efetivo das demais ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação principal F_{Q1}, durante a situação transitória. O fator $\psi_{0,ef}$ é igual ao fator ψ_0 adotado nas combinações normais, salvo quando a ação principal F_{Q1} tiver um tempo de atuação muito pequeno, caso em que $\psi_{0,ef}$ pode ser tomado igual ao correspondente ψ_2.

Tabela 1 - Coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes		Ações variáveis		
	Grande variabilidade	Pequena variabilidade	Recalques diferenciais	Variação de temperatura	Ações variáveis em geral, incluindo as decorrentes do uso
	γ_g [1)]	γ_g [1), 2)]	γ_q	γ_q [3)]	γ_q [4)]
Normais	1,4 (0,9)	1,3 (1,0)	1,2	1,2	1,4
Especiais ou de construção	1,3 (0,9)	1,2 (1,0)	1,2	1,0	1,2
Excepcionais	1,2 (0,9)	1,1 (1,0)	0	0	1,0

[1)] Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança. Ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

[2)] Todas as ações permanentes podem ser consideradas de pequena variabilidade quando o peso próprio da estrutura superar 75% da totalidade das ações permanentes. Também podem ser consideradas ações permanentes de pequena variabilidade os pesos próprios de componentes metálicos e pré-fabricados em geral, com controle rigoroso de peso. Excluem-se os revestimentos feitos *in loco* desses componentes.

[3)] A variação de temperatura citada não inclui a gerada por equipamentos, a qual deve ser considerada como ação decorrente do uso da edificação.

[4)] Ações decorrentes do uso da edificação incluem sobrecargas em pisos e em coberturas, ações provenientes de monovias, pontes rolantes ou outros equipamentos, etc.

5.3 Combinações de ações para os estados limites de utilização

Nas combinações de utilização são consideradas todas as ações permanentes, inclusive as deformações impostas permanentes, e as ações variáveis correspondentes a cada um dos tipos de combinações, conforme indicado a seguir:

a) combinações quase permanentes de utilização: combinações que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade deste período.

$$\sum_{i=1}^{m} F_{Gi} + \sum_{j=1}^{n} (\psi_{2j} F_{Qj})$$

b) combinações freqüentes de utilização: combinações que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de 10^5 vezes em 50 anos, ou que tenham duração total igual a uma parte não desprezível desse período, da ordem de 5%.

$$\sum_{i=1}^{m} F_{Gi} + \psi_1 F_{Q1} + \sum_{j=2}^{n} (\psi_{2j} F_{Qj})$$

c) combinações raras de utilização: combinações que podem atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura.

$$\sum_{i=1}^{m} F_{Gi} + F_{Q1} + \sum_{j=2}^{n} (\psi_{1j} F_{Qj})$$

Onde:

F_G é ação permanente;

F_{Q1} é a ação variável principal da combinação;

$\psi_1 F_Q$ é o valor freqüente da ação;

$\psi_2 F_Q$ é o valor quase permanente da ação;

ψ_1, ψ_2 são os fatores de utilização, conforme tabela 2.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela 2 - Fatores de combinação e fatores de utilização

Ações	ψ_0 [1)]	ψ_1	ψ_2
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
- Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,4	0,2	0
- Pressão dinâmica do vento nas estruturas em que a ação variável principal tem pequena variabilidade durante grandes intervalos de tempo (exemplo: edifícios de habitação)	0,6	0,2	0
Cargas acidentais (sobrecargas) nos edifícios:			
- Sem predominância de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,4	0,3	0,2
- Com predominância de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,6	0,4
- Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos:			
- Equipamentos de elevação e transporte	0,6	0,4	0,2
- Passarelas de pedestres	0,4	0,3	0,2

[1)] Os coeficientes ψ_0 devem ser admitidos como 1,0 para ações variáveis de mesma natureza da ação variável principal F_{Q1}.

5.4 Casos não previstos nesta Norma

Para os casos de combinações de ações referentes aos estados limites últimos ou de utilização não previstos nesta Norma, devem ser obedecidas as exigências da NBR 8681.

6 Análise estrutural e dimensionamento

6.1 Análise estrutural

A resposta da estrutura (esforços, deslocamentos, deformações, etc.) pode ser avaliada por análise linear (análise elástica clássica).

Nos casos em que forem previstas não-linearidades significativas no comportamento estrutural, os cálculos devem ser feitos com base em análise não-linear.

6.2 Bases para o dimensionamento

O método dos estados limites, adotado por esta Norma, estabelece que para o dimensionamento da estrutura nenhum estado limite aplicável deve ser excedido quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda sua vida útil. Os estados limites de utilização estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de serviço.

6.3 Dimensionamento para os estados limites últimos

O esforço resistente de cálculo de cada componente ou conjunto da estrutura deve ser igual ou superior ao esforço solicitante de cálculo.

O esforço resistente de cálculo deve ser calculado para cada estado limite último aplicável e é igual ao esforço resistente característico dividido pelo coeficiente de ponderação da resistência γ conforme estabelecido, para cada caso, nas seções 7 e 8.

Para os casos não previstos nas seções 7 e 8, o dimensionamento de barras, ligações ou conjuntos estruturais, deve ser feito com base em ensaios, conforme seção 9.

O esforço solicitante de cálculo deve ser calculado com base nas combinações apropriadas de ações para os estados limites últimos, conforme estabelecido em 5.2. Para o caso de análise nãolinear, devem ser adotadas as recomendações da NBR 8681.

6.4 Dimensionamento para os estados limites de utilização

A estrutura como um todo e seus componentes devem ser verificados para os estados limites de utilização, caracterizados em geral por deslocamentos excessivos e vibrações excessivas, que afetam a utilização normal da construção ou seu aspecto estético e provocam danos em materiais não-estruturais da construção.

Os valores limites a serem impostos à resposta da estrutura e que garantem sua plena utilização (por exemplo: deslocamentos, acelerações, etc.) devem ser escolhidos levando-se em consideração as funções previstas para a estrutura e para os materiais a ela vinculados.

Para o estado limite de deslocamentos excessivos nas estruturas correntes, devem ser adotadas combinações raras de utilização conforme 5.3-c). No anexo A são apresentados valores limites recomendados para deslocamentos.

Para o estado limite de vibrações excessivas, devem ser adotadas combinações freqüentes de utilização conforme 5.3-b).

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Para outros estados limites de utilização, deve ser consultada bibliografia especializada.

A verificação de um estado limite de utilização deve ser feita por condições do tipo:

$S_{d,uti} \leq S_{lim}$

Onde:

S_{lim} é o valor fixado para o efeito estrutural que determina o aparecimento do estado limite de utilização considerado;

$S_{d,uti}$ é o valor desse mesmo efeito, calculado com base nas combinações apropriadas de ações para os estados limites de utilização, conforme estabelecido em 5.3.

6.5 Resistência ao escoamento e aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio

A resistência ao escoamento utilizada no projeto deve ser adotada como um dos valores estabelecidos a seguir:

a) a resistência ao escoamento do aço virgem f_y, aplicável a qualquer caso, ou;

b) a resistência ao escoamento do aço modificada f_{ya} levando-se em consideração o efeito do trabalho a frio, conforme anexo B, aplicável somente aos casos de seções onde todos os seus elementos apresentam $\lambda_p \leq 0{,}673$ calculado com $\sigma = f_y$ conforme 7.2.

6.6 Durabilidade

Para assegurar adequada durabilidade dos perfis e demais componentes de aço formados a frio, tendo em vista a utilização prevista da estrutura e sua vida útil, os seguintes fatores inter-relacionados devem ser observados na fase de projeto:

a) a utilização prevista da edificação;

b) o desempenho esperado;

c) as condições ambientais no tocante à corrosão do aço;

d) a composição química, as propriedades mecânicas e o desempenho global dos materiais;

e) os efeitos decorrentes da associação de materiais diferentes;

f) as dimensões, a forma e os detalhes construtivos, em especial as ligações;

g) a qualidade e o controle da qualidade na fabricação e na montagem (no que couber, devem ser obedecidas as exigências do anexo P da NBR 8800:1986);

h) as medidas de proteção contra corrosão;

i) as prováveis manutenções ao longo da vida útil da edificação.

7 Requisitos para o dimensionamento de barras

7.1 Valores máximos da relação largura-espessura

A relação largura-espessura de um elemento, desconsiderando enrijecedores intermediários, não deve ultrapassar os valores estabelecidos na tabela 3.

Tabela 3 - Valores máximos da relação largura-espessura

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura[1)]
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada à alma ou mesa e a outra ao enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{máx} = 60$[2)]
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada à alma e a outra à mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_s \geq I_a$ e $D/b \leq 0{,}8$, conforme 7.2.2	$(b/t)_{máx} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{máx} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{máx} = 500$[3)]
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$ e $D/b \leq 0{,}8$, conforme 7.2.2	$(b/t)_{máx} = 60$[2)]
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{máx} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 7.5.1	$(b/t)_{máx} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 7.5.1	$(b/t)_{máx} = 300$

[1)] b é a largura do elemento; t é a espessura.

[2)] Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{máx} = 30$.

[3)] Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{máx} = 250$.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

7.2 Flambagem local

7.2.1 Elementos AA e AL

A flambagem local de elementos totalmente ou parcialmente comprimidos deve ser considerada por meio de larguras efetivas, calculadas conforme 7.2.1.1 e 7.2.1.2.

7.2.1.1 Cálculo de resistência

Para o cálculo da resistência de perfis formados por elementos esbeltos, deve ser considerada a redução de sua resistência, provocada pela flambagem local. Para isto, devem ser calculadas as larguras efetivas b_{ef} dos elementos da seção transversal que se encontrem total ou parcialmente submetidos a tensões normais de compressão, conforme descrito a seguir:

- todos os elementos AA indicados na tabela 4 e os elementos AL indicados na tabela 5 sem inversão no sinal da tensão ($\psi \geq 0$):

$$b_{ef} = b\,(1-0{,}22/\lambda_p)/\lambda_p \leq b$$

- elementos AL indicados na tabela 5 com inversão no sinal da tensão ($\psi < 0$):

$$b_{ef} = b_c\,(1-0{,}22/\lambda_p)/\lambda_p \leq b_c$$

Onde:

b é a largura do elemento;

b_c é a largura da região comprimida do elemento, calculada com base na seção efetiva;

λ_p é o índice de esbeltez reduzido do elemento, definido como:

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

Para $\lambda_p \leq 0{,}673$, a largura efetiva é a própria largura do elemento.

Onde:

t é a espessura do elemento;

k é o coeficiente de flambagem local, calculado de acordo com a tabela 4 para elementos AA ou de acordo com a tabela 5 para elementos AL;

σ é a tensão normal de compressão, definida conforme descrito a seguir:

1) Estado limite último de escoamento da seção: para cada elemento totalmente ou parcialmente comprimido, σ é a máxima tensão de compressão, calculada para a seção efetiva, que ocorre quando a seção atinge o escoamento. Se a máxima tensão for de tração, σ pode ser calculada admitindo-se distribuição linear de tensões. A seção efetiva, neste caso, deve ser determinada por aproximações sucessivas.

2) Estado limite último de flambagem da barra: se a barra for submetida à compressão, $\sigma = \rho f_y$, sendo ρ o fator de redução associado à flambagem conforme 7.7.2. Se a barra for submetida à flexão, $\sigma = \rho_{FLT} f_y$, sendo ρ_{FLT} o fator de redução associado à flambagem lateral com torção conforme 7.8.1.2.

7.2.1.2 Cálculo de deslocamentos

O cálculo de deslocamentos em barras com seções transversais constituídas por elementos esbeltos deve ser feito por aproximações sucessivas, considerando a redução de sua rigidez provocada pela flambagem local. Para isto, devem ser calculadas as larguras efetivas b_{ef} dos elementos da seção transversal que se encontrem totalmente ou parcialmente submetidos a tensões normais de compressão, conforme 7.2.1.1, substituindo λ_p por λ_{pd}.

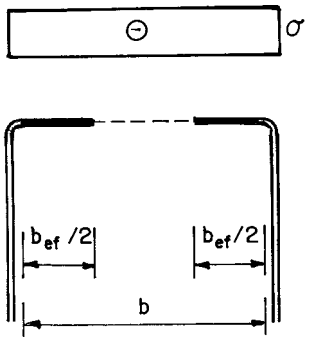
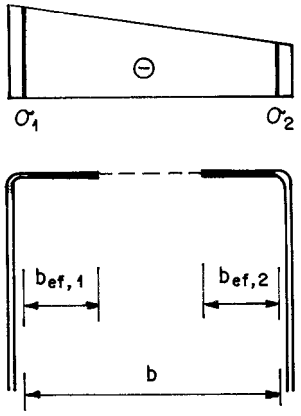
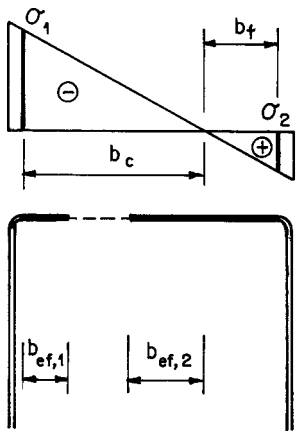
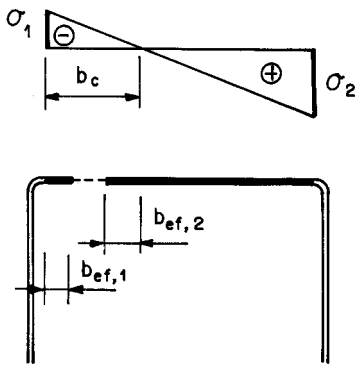
$$\lambda_{pd} = \frac{b/t}{0{,}95(kE/\sigma_n)^{0,5}}$$

Onde:

k é o coeficiente de flambagem local, calculado de acordo com a tabela 4 para elementos AA ou de acordo com a tabela 5 para elementos AL e σ_n é a máxima tensão normal de compressão, calculada para a seção transversal efetiva e considerando as combinações de ações para os estados limite de utilização conforme 5.3.

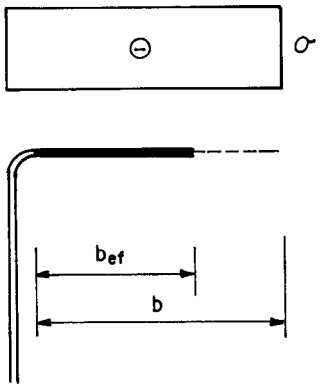
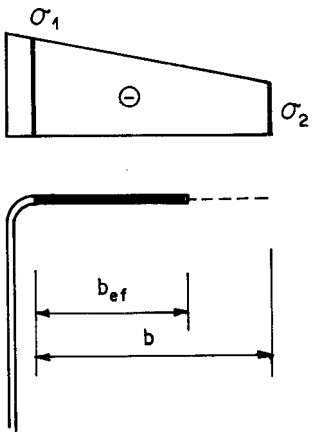
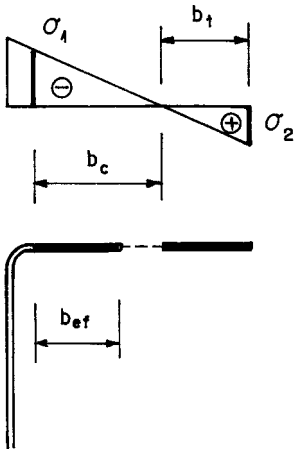
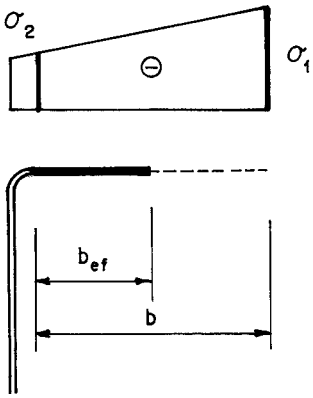
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela 4 - Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA

Caso a		$\psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1{,}0$ $k = 4{,}0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2/\sigma_1 < 1{,}0$ $b_{ef,1} = b_{ef}/(3-\psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Caso c	 NOTA - A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$-0{,}236 < \psi = \sigma_2/\sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef}/(3-\psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Caso d	 NOTA - A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$\psi = \sigma_2/\sigma_1 \leq -0{,}236$ $b_{ef,1} = b_{ef}/(3-\psi)$ $b_{ef,2} = 0{,}5b_{ef}$ sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
NOTA - O sinal (-) indica compressão.		

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela 5 - Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AL

Caso a		$\psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1{,}0$ $k = 0{,}43$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2/\sigma_1 < 1{,}0$ $k = 0{,}578/(\psi + 0{,}34)$
Caso c	 NOTA - A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$-1{,}0 \leq \psi = \sigma 2/\sigma 1 < 0$ $k = 1{,}7 - 5\psi + 17{,}1\psi 2$
Caso d		$-1{,}0 \leq \psi = \sigma_2/\sigma_1 \leq 1{,}0$ $k = 0{,}57 - 0{,}21\psi + 0{,}07\psi^2$
NOTA - O sinal (-) indica compressão.		

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

7.2.2 Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com um enrijecedor intermediário ou com enrijecedor de borda

Nesta subseção os símbolos e seus respectivos significados são os seguintes:

$$\lambda_{p0} = \frac{b_0/t}{1{,}9(E/\sigma)^{0,5}} \quad \text{para 7.2.2.1}$$

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0{,}623(E/\sigma)^{0,5}} \quad \text{para 7.2.2.2}$$

Onde:

σ é a tensão normal definida em 7.2.1.1;

b_0 é a largura do elemento com enrijecedor intermediário (ver figura 2);

k é o coeficiente de flambagem local;

D, b, d são as dimensões indicadas na figura 3;

d_{ef} é a largura efetiva do enrijecedor calculada conforme 7.2.1.1;

d_s é a largura efetiva reduzida do enrijecedor e adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do prefil;

A_s é a área reduzida do enrijecedor calculada conforme indicado nesta seção e adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil. O centróide e os momentos de inércia do enrijecedor devem ser assumidos em relação à sua seção bruta;

I_a é o momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário ou de borda;

I_s, A_{ef} são o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao seu eixo principal paralelo ao elemento a ser enrijecido e a área efetiva do enrijecedor, respectivamente. Para enrijecedor de borda, a região das dobras entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada como parte integrante do enrijecedor.

Para o enrijecedor representado na figura 3:

$I_s = (d^3 t \operatorname{sen}^2\theta)/12$

$A_{ef} = d_{ef}\, t$

7.2.2.1 Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com um enrijecedor intermediário

A largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com um enrijecedor intermediário deve ser calculada conforme a) e b), para os casos de cálculo de resistência e deslocamentos, respectivamente.

a) cálculo de resistência: para o cálculo da resistência de perfis formados por elementos com um enrijecedor intermediário, deve ser considerada a redução de sua resistência, provocada pela flambagem local. Para isto, deve ser calculada a largura efetiva do elemento e a área efetiva do enrijecedor, conforme descrito a seguir:

Caso I: $\lambda_{p0} \leq 0{,}673$

enrijecedor intermediário não é necessário

$b_{ef} = b$

$A_s = A_{ef}$

Caso II: $0{,}673 < \lambda_{p0} < 2{,}03$

$I_a = 50t^4[1{,}484\lambda_{p0} - 1]$

b_{ef} e A_{ef} devem ser calculadas conforme 7.2.1.1, onde:

$k = 3(I_s/I_a)^{0,5} + 1 \leq 4$

$A_s = A_{ef}\,(I_s/I_a) \leq A_{ef}$

Caso III: $\lambda_{p0} \geq 2{,}03$

$I_a = [190\lambda_{p0} - 285]t^4$

b_{ef} e A_{ef} devem ser calculadas conforme 7.2.1.1, onde:

$k = 3(I_s/I_a)^{0,33} + 1 \leq 4$

$A_s = A_{ef}\,(I_s/I_a) \leq A_{ef}$

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

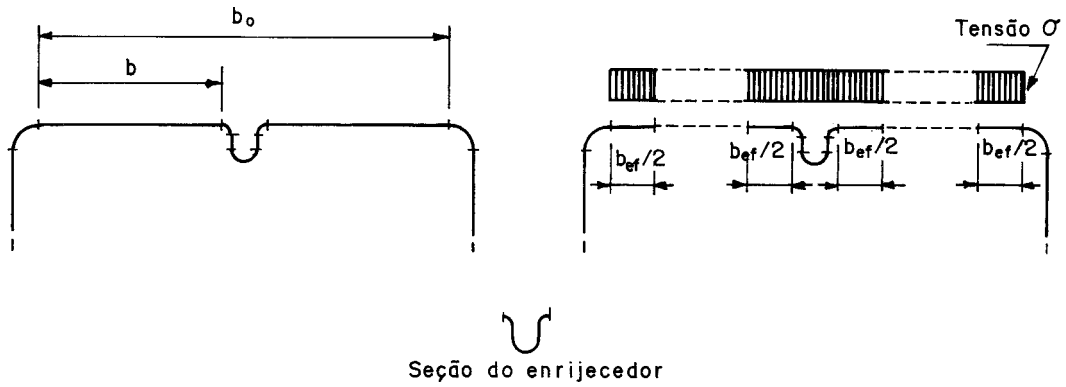


Figura 2 - Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor intermediário

b) cálculo de deslocamentos: deve ser adotado o mesmo procedimento estabelecido em 7.2.2.1-a), substituindo σ por σ_n, que é a tensão calculada considerando as combinações de ações para os estados limites de utilização conforme 5.3.

7.2.2.2 Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda

A largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda deve ser calculada conforme a) e b), para os casos de cálculo de resistência e deslocamentos, respectivamente.

a) cálculo de resistência: para o cálculo da resistência de perfis formados por elementos com enrijecedor de borda, deve ser considerada a redução de sua resistência, provocada pela flambagem local. Para isto, devem ser calculadas as larguras efetivas do elemento e do enrijecedor, conforme descrito a seguir:

Caso I: $\lambda_{p0} \leq 0{,}673$

enrijecedor de borda não é necessário

$b_{ef} = b$

$d_s = d_{ef}$ (para enrijecedor de borda simples)

$A_s = A_{ef}$ (para outros tipos de enrijecedor)

Caso II: $0{,}673 < \lambda_{p0} < 2{,}03$

$I_a = 400t^4[0{,}49\lambda_{p0} - 0{,}33]^3$

$b_{ef,2} = (I_s/I_a)(b_{ef}/2) \leq (b_{ef}/2)$

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

b_{ef} deve ser calculada conforme 7.2.1.1, onde:

$k = (I_s/I_a)^{0,5}\,(k_a - 0{,}43) + 0{,}43 \leq k_a$

$k_a = 5{,}25 - 5(D/b) \leq 4{,}0$ para enrijecedor de borda simples com $40° \leq \theta \leq 140°$ e

$D/b \leq 0{,}8$, onde θ é indicado na figura 3

$d_s = (I_s/I_a)\,d_{ef} \leq d_{ef}$

$k_a = 4{,}0$ para outros tipos de enrijecedor

$A_s = (I_s/I_a)\,A_{ef} \leq A_{ef}$

Caso III: $\lambda_{p0} \geq 2{,}03$

$I_a = [56\lambda_{p0} + 5]t^4$

$k = (I_s/I_a)^{0,33}\,(k_a - 0{,}43) + 0{,}43 \leq k_a$

b_{ef}, $b_{ef,1}$, $b_{ef,2}$, d_s, k_a e A_s devem ser calculados conforme caso II

Licença de uso exclusivo para Petrobras S.A.

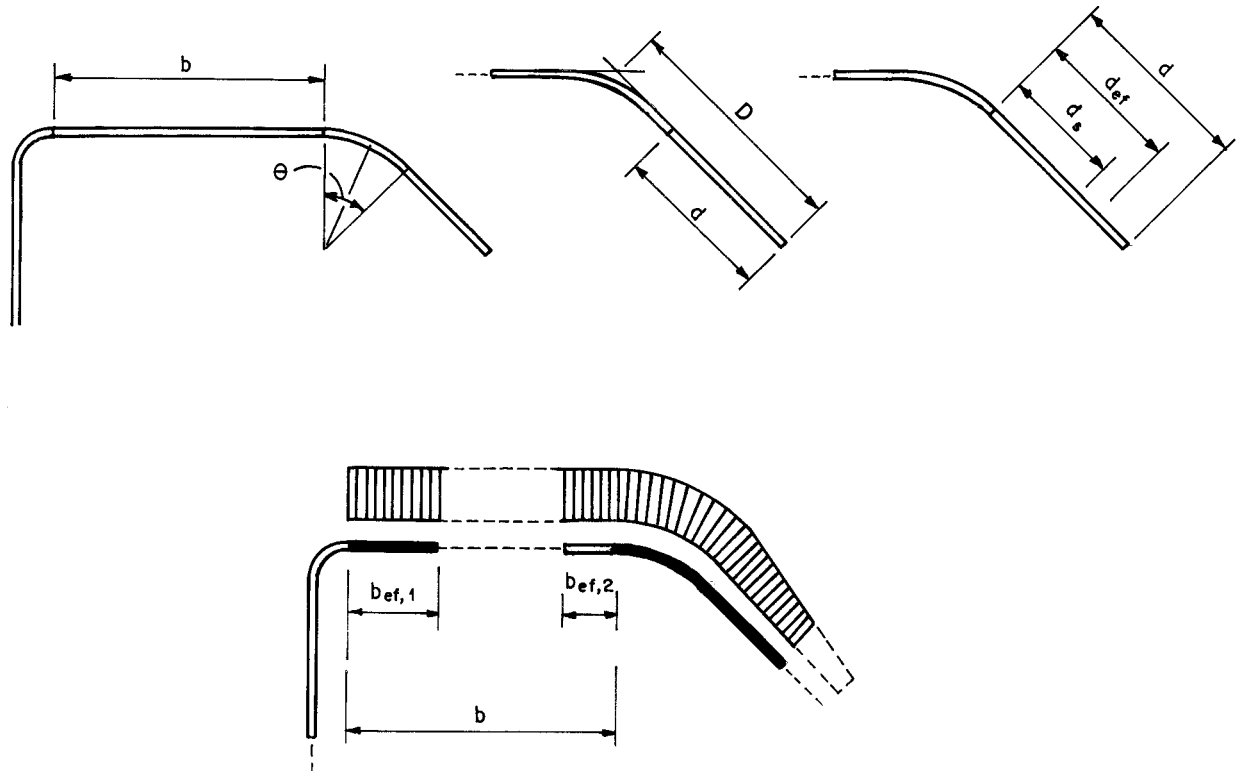


Figura 3 - Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda

b) cálculo de deslocamentos: deve ser adotado o mesmo procedimento estabelecido em 7.2.2.2-a), substituindo σ por σ_n, que é a tensão calculada considerando as combinações de ações para os estados limites de utilização conforme 5.3.

7.2.3 Perfis tubulares com seção transversal circular

A flambagem local de perfis tubulares com seção transversal circular deve ser considerada por meio das propriedades efetivas da seção, conforme a) e b).

a) cálculo de resistência: para os perfis tubulares com seção transversal circular submetidos à compressão, deve ser considerada a redução de sua resistência, provocada pela flambagem local, mediante o cálculo da área efetiva da seção A_{ef}, conforme descrito a seguir:

$$A_{ef} = [1 - (1 - 0{,}5Af_y/N_e)(1 - A_0/A)]A \leq A$$

Onde:

A é a área bruta da seção transversal do tubo;

$A_o = (0{,}037tE/Df_y + 0{,}667)A \leq A$ para $D/t \leq 0{,}44(E/f_y)$;

D é o diâmetro externo do tubo;

N_e é a força normal de flambagem elástica da barra;

t é a espessura da parede do tubo.

b) cálculo de deslocamentos: o cálculo de deslocamentos em barras tubulares com seção transversal circular pode ser feito com as propriedades geométricas da seção transversal bruta.

7.3 Efeito *shear lag*

Para vigas com comprimento L inferior a $30b_f$, submetidas a uma força concentrada ou várias forças concentradas com espaçamento superior a $2b_f$, as propriedades geométricas da seção devem ser determinadas tomando-se como larguras efetivas das mesas tracionada e comprimida, a largura real multiplicada pelos fatores de redução indicados na tabela 6. Para a mesa comprimida, tal largura efetiva não pode ultrapassar a determinada com base na flambagem local conforme 7.2.

Licença de uso exclusiva para Petrobras S.A.

Tabela 6 - Fatores de redução da largura da mesa

L/b_f	Fatores de redução	L/b_f	Fatores de redução
30	1,00	14	0,82
25	0,96	12	0,78
20	0,91	10	0,73
18	0,89	8	0,67
16	0,86	6	0,55

Onde:

L é o vão das vigas simplesmente apoiadas, ou a distância entre pontos de inflexão para as vigas contínuas, ou duas vezes o comprimento dos balanços;

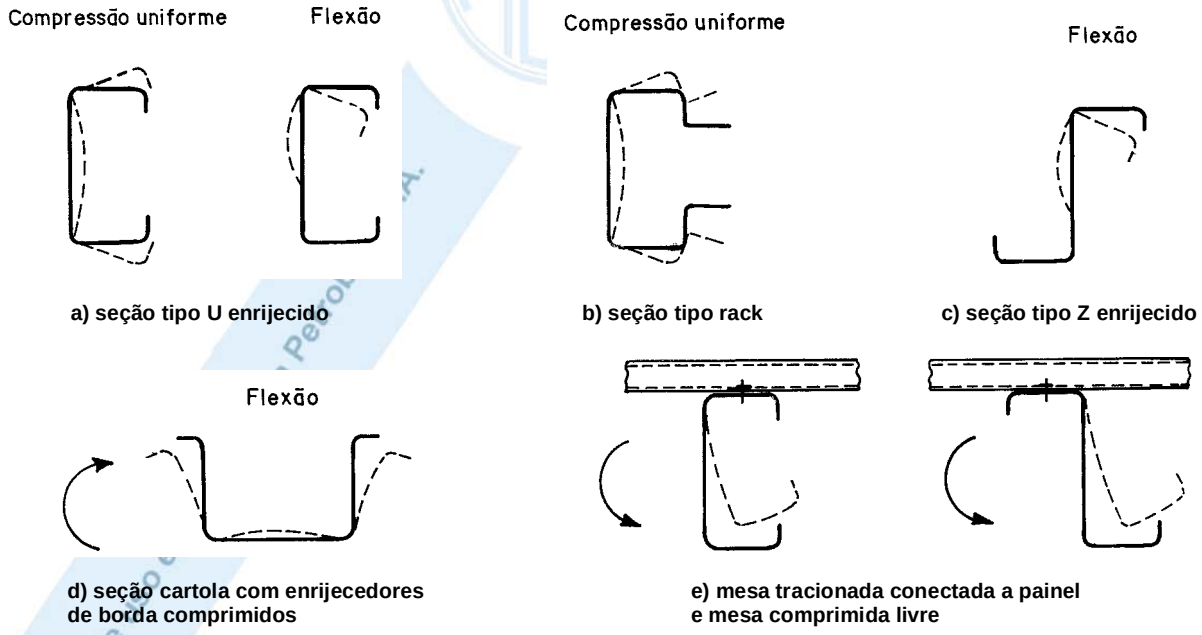
b_f é a largura de referência, tomada como a largura livre da mesa (distância entre a face da alma e a borda livre) para seções I, U e Z; ou a metade da distância livre entre as almas para seções caixão, cartola e similares. Para mesas de seção I, U e Z enrijecidas nas bordas, b_f deve ser tomada como a largura livre da mesa mais a largura nominal do enrijecedor de borda.

7.4 Flambagem por distorção da seção transversal

As seções transversais de barras submetidas à compressão centrada ou à flexão, principalmente as constituídas por elementos com enrijecedores de borda, podem apresentar flambagem por distorção, conforme ilustrado na figura 4. Dependendo da forma da seção e das dimensões dos elementos, o modo de flambagem por distorção pode corresponder ao modo crítico, devendo portanto ser considerado no dimensionamento, conforme 7.7.3 para barras submetidas à compressão centrada ou 7.8.1.3 para barras submetidas à flexão.

O cálculo do valor da tensão convencional de flambagem elástica por distorção pode ser feito com base na teoria da estabilidade elástica, ou conforme o procedimento apresentado no anexo D para barras isoladas [figuras 4-a) a 4-d)] ou anexo F para barras com painel conectado à mesa tracionada e à mesa comprimida livre [figura 4-e)].

A verificação da flambagem por distorção em perfis U simples (sem enrijecedores de borda) submetidos à compressão centrada ou à flexão pode ser dispensada, exceto no caso de perfis submetidos à flexão com painel conectado à mesa tracionada e à mesa comprimida livre, onde a flambagem por distorção do conjunto alma-mesa comprimida pode corresponder ao modo crítico. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada.



a) seção tipo U enrijecido

b) seção tipo rack

c) seção tipo Z enrijecido

d) seção cartola com enrijecedores de borda comprimidos

e) mesa tracionada conectada a painel e mesa comprimida livre

Figura 4 - Exemplos de flambagem por distorção da seção transversal

7.5 Enrijecedores transversais

7.5.1 Enrijecedores transversais em seções com força concentrada

Devem ser previstos enrijecedores transversais nas seções dos apoios e nas seções intermediárias sujeitas a forças concentradas, exceto nos casos em que se demonstre que tais enrijecedores não sejam necessários (ver anexo E), ou ainda nos casos onde as almas sejam ligadas a outras vigas ou pilares. A força normal resistente de cálculo de enrijecedores transversais $N_{s,Rd}$ deve ser calculada por:

a) enrijecedores tracionados: $N_{s,Rd} = Af_y/\gamma$ $(\gamma = 1,1)$

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

b) enrijecedores comprimidos: $N_{s,Rd} = \rho A f_y/\gamma$ ($\gamma = 1,1$)

Onde:

ρ é o fator de redução associado à flambagem por flexão de uma barra hipotética, com comprimento efetivo de flambagem *KL* igual à altura da viga e a seção transversal a ser considerada é a formada pelo enrijecedor mais uma faixa de alma de largura igual a *10t*, se o enrijecedor for de extremidade, ou igual a *18t* se o enrijecedor for intermediário. Deve ser admitida flambagem por flexão em relação ao eixo contido no plano médio da alma, adotando-se curva de resistência à compressão "c" conforme 7.7.2;

$A = 18t^2 + A_s$ para enrijecedores posicionados em seções intermediárias da barra, ou

$A = 10t^2 + A_s$ para enrijecedores posicionados em seções de extremidade da barra;

Onde:

A_s é a área da seção transversal do enrijecedor;

t é a espessura da alma da viga.

A relação largura-espessura do enrijecedor b/t_s não deve ultrapassar os seguintes valores:

$1,28(E/f_y)^{0,5}$ para enrijecedores AA

$0,42(E/f_y)^{0,5}$ para enrijecedores AL

7.5.2 Enrijecedores transversais para força cortante

Os enrijecedores transversais para força cortante, previstos em 7.8.2, devem atender às seguintes exigências:

- a relação a/h não deve exceder 3,0 nem $[260/(h/t)]^2$;

- o momento de inércia I_s de um enrijecedor simples ou duplo, em relação ao eixo contido no plano médio da alma, não deve ser inferior a:

$$I_{s,\min} = 5ht^3(h/a - 0,7a/h) \geq (h/50)^4$$

7.6 Barras submetidas à tração

7.6.1 A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor entre:

$N_{t,Rd} = Af_y/\gamma$ ($\gamma = 1,1$)

$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u/\gamma$ ($\gamma = 1,35$)

Onde:

A é a área bruta da seção transversal da barra;

A_n é a área líquida da seção transversal da barra, devendo ser considerado o seguinte:

- para ligações parafusadas em chapas, devem ser analisadas as prováveis linhas de ruptura [figura 5-a)], sendo a seção crítica aquela correspondente ao menor valor da área líquida. A área líquida da seção de ruptura analisada deve ser calculada por:

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

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

d_f é a dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação, conforme 8.3.2;

n_f é a quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada;

s é o espaçamento dos furos na direção da solicitação [figura 5-a)];

g é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação [figura 5-a)];

t é a espessura da parte conectada analisada;

C_t é o coeficiente de redução da área líquida, dado por:

a) chapas com ligações parafusadas:

- todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal:

$$C_t = 2,5(d/g) \leq 1,0$$

- dois parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

$C_t = 0,5 + 1,25(d/g) \leq 1,0$

- três parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$C_t = 0,67 + 0,83(d/g) \leq 1,0$

- quatro ou mais parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$C_t = 0,75 + 0,625(d/g) \leq 1,0$

Onde:

d é o diâmetro nominal do parafuso;

em casos de espaçamentos diferentes, tomar sempre o maior valor de g para cálculo de C_t;

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

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

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

b) perfis com ligações parafusadas:

- todos os elementos conectados, com dois ou mais parafusos na direção da solicitação:

$C_t = 1,0$

- cantoneiras com dois ou mais parafusos na direção da solicitação [figura 5-c)]:

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

- perfis U com dois ou mais parafusos na direção da solicitação [figura 5-c)]:

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

- nos casos onde todos os parafusos estão contidos em uma única seção transversal, o perfil deve ser tratado como chapa equivalente [figura 5-b)], conforme 7.6.1-a), com C_t dado por:

$C_t = 2,5(d/g) \leq 1,0$

c) chapas com ligações soldadas:

- soldas longitudinais associadas a soldas transversais:

$C_t = 1,0$

- somente soldas longitudinais ao longo de ambas as bordas:

para $b \leq L < 1,5b$: $C_t = 0,75$

para $1,5b \leq L < 2b$: $C_t = 0,87$

para $L \geq 2b$: $C_t = 1,0$

d) perfis com ligações soldadas:

- todos os elementos conectados:

$C_t = 1,0$

- cantoneiras com soldas longitudinais [figura 5-d)]:

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

- perfis U com soldas longitudinais (figura 5d):

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

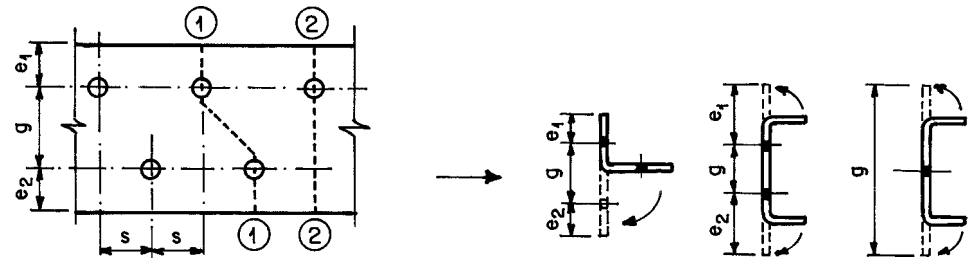
Onde:

b é a largura da chapa;

L é o comprimento da ligação parafusada [figura 5-c)] ou o comprimento da solda [figura 5-d)];

x é a excentricidade da ligação, tomada como a distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil [figuras 5-c) e 5-d)].

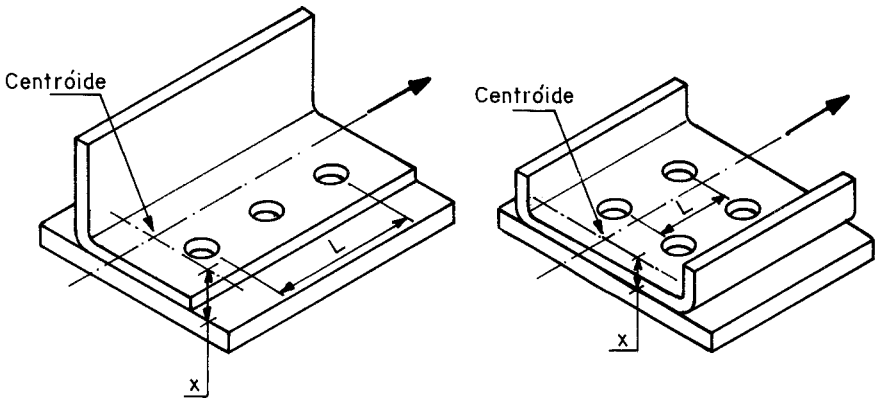
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.



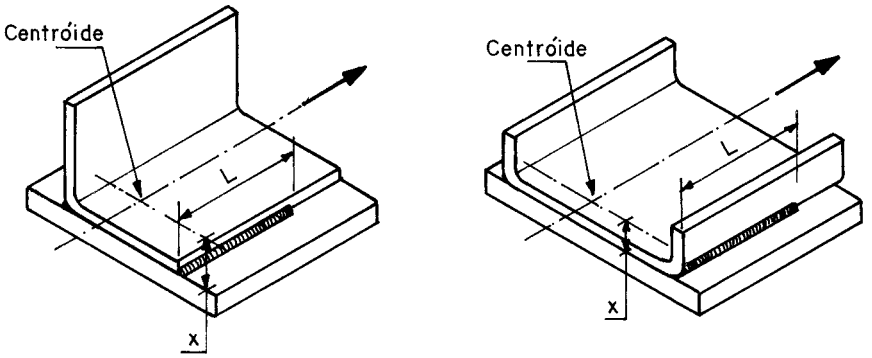
1-1: linha de ruptura com segmento inclinado
2-2: linha de ruptura perpendicular à solicitação

a) prováveis linhas de ruptura

b) perfis tratados com chapa (todos os parafusos contidos em uma única seção)



c) ligação parafusada em perfis



d) ligação soldada em perfis

Figura 5 - Linhas de ruptura e grandezas para cálculo do coeficiente C_t

7.6.2 É recomendado que o índice de esbeltez *KL/r* das barras tracionadas não exceda 300. Para as barras compostas tracionadas, ou seja, aquelas constituídas por um ou mais perfis associados, é também recomendado que o índice de esbeltez de cada perfil componente da barra não exceda 300.

7.7 Barras submetidas à compressão centrada

7.7.1 Generalidades

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado em 7.7.2 e 7.7.3.

7.7.2 Flambagem da barra por flexão, por torção ou por flexo-torção

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \rho\, A_{ef}\, f_y/\gamma \quad (\gamma = 1{,}1)$$

Onde:

ρ é o fator de redução associado à flambagem, apresentado na tabela 8 ou calculado por:

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_0{}^2)^{0,5}} \leq 1{,}0$$

Uso exclusivo para Petrobrás S.A.

$$\beta = 0{,}5[1+\alpha(\lambda_0 - 0{,}2)+\lambda_0^2]$$

Onde:

α é o fator de imperfeição inicial. Nos casos de flambagem por flexão, os valores de α variam de acordo com o tipo de seção e eixo de flambagem, conforme tabela 7, sendo:

curva a: $\alpha = 0{,}21$

curva b: $\alpha = 0{,}34$

curva c: $\alpha = 0{,}49$

Nos casos de flambagem por torção ou por flexo-torção, deve-se tomar a curva b.

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas, dado por:

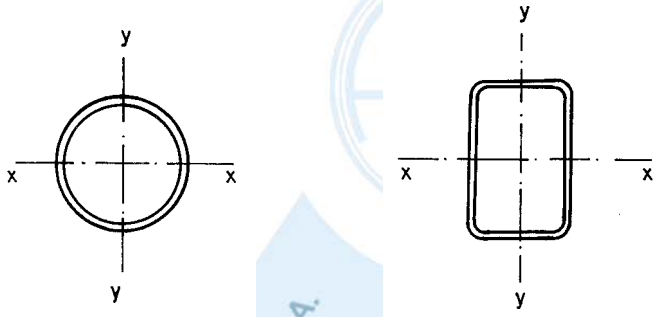
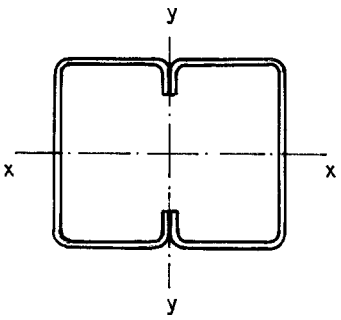
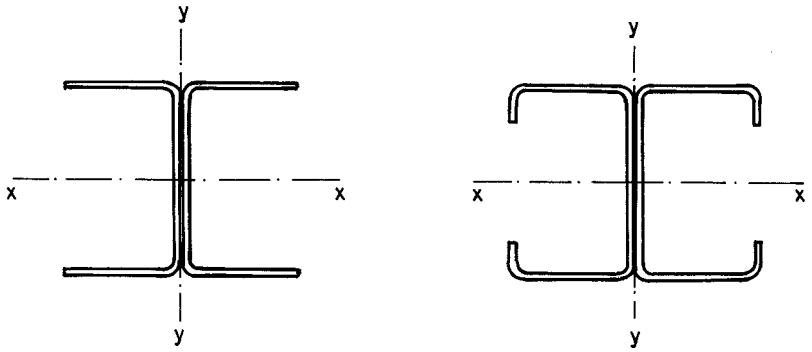
$$\lambda_0 = \left[\frac{A_{ef} f_y}{N_e}\right]^{0,5}$$

Onde:

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2, adotando $\sigma = \rho f_y$. Nesse caso ρ pode ser determinado de forma aproximada, tomando-se diretamente $A_{ef} = A$ para o cálculo de λ_0, dispensando processo iterativo.

N_e é a força normal de flambagem elástica da barra, conforme 7.7.2.1, 7.7.2.2 ou 7.7.2.3.

Tabela 7 - Classificação de seções e respectivas curvas de resistência à compressão associadas à flambagem por flexão

Tipo de seção transversal		Eixos	Curvas
		x-x ou y-y	a
	Empregando-se f_y [conforme 6.5-a)] Empregando-se f_{ya} [conforme 6.5-b)]	x-x ou y-y x-x ou y-y	b c
		x-x y-y	a b

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela 7 (conclusão)

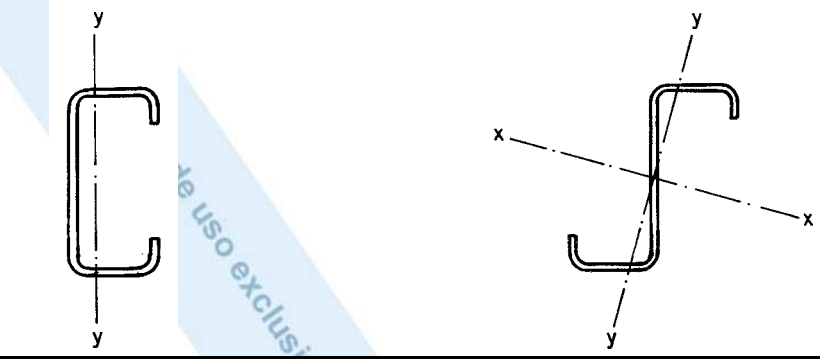
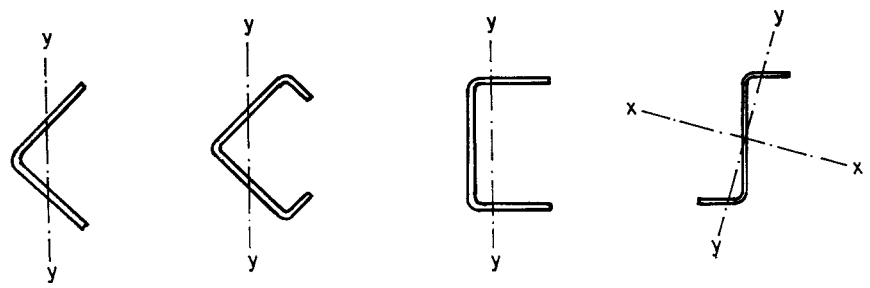
Tipo de seção transversal	Eixos	Curvas
	Indicados	b
	Indicados	c
Para demais seções	Aplicáveis	c

Tabela 8 - Valores de ρ

Valores de ρ para curva *a* (α = 0,21)											
λ_o	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_o
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,0
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,1
0,2	1,000	0,998	0,996	0,993	0,991	0,989	0,987	0,984	0,982	0,980	0,2
0,3	0,977	0,975	0,973	0,970	0,968	0,965	0,963	0,960	0,958	0,955	0,3
0,4	0,953	0,950	0,947	0,945	0,942	0,939	0,936	0,933	0,930	0,927	0,4
0,5	0,924	0,921	0,918	0,915	0,911	0,908	0,905	0,901	0,897	0,894	0,5
0,6	0,890	0,886	0,882	0,878	0,874	0,870	0,866	0,861	0,857	0,852	0,6
0,7	0,848	0,843	0,838	0,833	0,828	0,823	0,818	0,812	0,807	0,801	0,7
0,8	0,796	0,790	0,784	0,778	0,772	0,766	0,760	0,753	0,747	0,740	0,8
0,9	0,734	0,727	0,721	0,714	0,707	0,700	0,693	0,686	0,679	0,672	0,9
1,0	0,666	0,659	0,652	0,645	0,638	0,631	0,624	0,617	0,610	0,603	1,0
1,1	0,596	0,589	0,582	0,576	0,569	0,562	0,556	0,549	0,543	0,536	1,1
1,2	0,530	0,524	0,517	0,511	0,505	0,499	0,493	0,487	0,482	0,476	1,2
1,3	0,470	0,465	0,459	0,454	0,448	0,443	0,438	0,433	0,428	0,423	1,3
1,4	0,418	0,413	0,408	0,403	0,399	0,394	0,390	0,385	0,381	0,377	1,4
1,5	0,372	0,368	0,364	0,360	0,356	0,352	0,348	0,344	0,341	0,337	1,5
1,6	0,333	0,330	0,326	0,322	0,319	0,316	0,312	0,309	0,306	0,302	1,6
1,7	0,299	0,296	0,293	0,290	0,287	0,284	0,281	0,278	0,276	0,273	1,7
1,8	0,270	0,267	0,265	0,262	0,260	0,257	0,255	0,252	0,250	0,247	1,8
1,9	0,245	0,242	0,240	0,238	0,236	0,233	0,231	0,229	0,227	0,225	1,9
2,0	0,223	0,220	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	2,0
2,1	0,204	0,202	0,200	0,198	0,196	0,195	0,193	0,191	0,190	0,188	2,1
2,2	0,187	0,185	0,183	0,182	0,180	0,179	0,177	0,176	0,174	0,173	2,2

Tabela 8 (continuação)

Valores de ρ para curva *b* (α = 0,34)											
λ_o	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_o
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,0
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,1
0,2	1,000	0,996	0,993	0,989	0,986	0,982	0,979	0,975	0,971	0,968	0,2
0,3	0,964	0,960	0,957	0,953	0,949	0,945	0,942	0,938	0,934	0,930	0,3
0,4	0,926	0,922	0,918	0,914	0,910	0,906	0,902	0,897	0,893	0,889	0,4
0,5	0,884	0,880	0,875	0,871	0,866	0,861	0,857	0,852	0,847	0,842	0,5
0,6	0,837	0,832	0,827	0,822	0,816	0,811	0,806	0,800	0,795	0,789	0,6
0,7	0,784	0,778	0,772	0,766	0,761	0,755	0,749	0,743	0,737	0,731	0,7
0,8	0,724	0,718	0,712	0,706	0,699	0,693	0,687	0,680	0,674	0,668	0,8
0,9	0,661	0,655	0,648	0,642	0,635	0,629	0,623	0,616	0,610	0,603	0,9
1,0	0,597	0,591	0,584	0,578	0,572	0,566	0,559	0,553	0,547	0,541	1,0
1,1	0,535	0,529	0,523	0,518	0,512	0,506	0,500	0,495	0,489	0,484	1,1
1,2	0,478	0,473	0,467	0,462	0,457	0,452	0,447	0,442	0,437	0,432	1,2
1,3	0,427	0,422	0,417	0,413	0,408	0,404	0,399	0,395	0,390	0,386	1,3
1,4	0,382	0,378	0,373	0,369	0,365	0,361	0,357	0,354	0,350	0,346	1,4
1,5	0,342	0,339	0,335	0,331	0,328	0,324	0,321	0,318	0,314	0,311	1,5
1,6	0,308	0,305	0,302	0,299	0,295	0,292	0,289	0,287	0,284	0,281	1,6
1,7	0,278	0,275	0,273	0,270	0,267	0,265	0,262	0,259	0,257	0,255	1,7
1,8	0,252	0,250	0,247	0,245	0,243	0,240	0,238	0,236	0,234	0,231	1,8
1,9	0,229	0,227	0,225	0,223	0,221	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	1,9
2,0	0,209	0,208	0,206	0,204	0,202	0,200	0,199	0,197	0,195	0,194	2,0
2,1	0,192	0,190	0,189	0,187	0,186	0,184	0,182	0,181	0,179	0,178	2,1
2,2	0,176	0,175	0,174	0,172	0,171	0,169	0,168	0,167	0,165	0,164	2,2
Valores de ρ para *curva c* (α = 0,49)											
λ_o	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_o
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,0
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,1
0,2	1,000	0,995	0,990	0,985	0,980	0,975	0,969	0,964	0,959	0,954	0,2
0,3	0,949	0,944	0,939	0,934	0,929	0,923	0,918	0,913	0,908	0,903	0,3
0,4	0,897	0,892	0,887	0,881	0,876	0,871	0,865	0,860	0,854	0,849	0,4
0,5	0,843	0,837	0,832	0,826	0,820	0,815	0,809	0,803	0,797	0,791	0,5
0,6	0,785	0,779	0,773	0,767	0,761	0,755	0,749	0,743	0,737	0,731	0,6
0,7	0,725	0,718	0,712	0,706	0,700	0,694	0,687	0,681	0,675	0,668	0,7
0,8	0,662	0,656	0,650	0,643	0,637	0,631	0,625	0,618	0,612	0,606	0,8
0,9	0,600	0,594	0,588	0,582	0,575	0,569	0,563	0,558	0,552	0,546	0,9
1,0	0,540	0,534	0,528	0,523	0,517	0,511	0,506	0,500	0,495	0,490	1,0
1,1	0,484	0,479	0,474	0,469	0,463	0,458	0,453	0,448	0,443	0,439	1,1
1,2	0,434	0,429	0,424	0,420	0,415	0,411	0,406	0,402	0,397	0,393	1,2
1,3	0,389	0,385	0,380	0,376	0,372	0,368	0,364	0,361	0,357	0,353	1,3
1,4	0,349	0,346	0,342	0,338	0,335	0,331	0,328	0,324	0,321	0,318	1,4
1,5	0,315	0,311	0,308	0,305	0,302	0,299	0,296	0,293	0,290	0,287	1,5
1,6	0,284	0,281	0,279	0,276	0,273	0,271	0,268	0,265	0,263	0,260	1,6
1,7	0,258	0,255	0,253	0,250	0,248	0,246	0,243	0,241	0,239	0,237	1,7
1,8	0,235	0,232	0,230	0,228	0,226	0,224	0,222	0,220	0,218	0,216	1,8
1,9	0,214	0,212	0,210	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	0,200	0,198	1,9
2,0	0,196	0,195	0,193	0,191	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	0,182	2,0
2,1	0,180	0,179	0,177	0,176	0,174	0,173	0,172	0,170	0,169	0,168	2,1
2,2	0,166	0,165	0,164	0,162	0,161	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	2,2

7.7.2.1 Perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto

A força normal de flambagem elástica N_e é o menor valor entre os obtidos em a), b) e c):

a) força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal x:

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

b) força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y:

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

c) força normal de flambagem elástica por torção:

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^{\,2}}\left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} + G I_t\right]$$

Onde:

C_w é a constante de empenamento da seção;

E é o módulo de elasticidade;

G é o módulo de elasticidade transversal;

I_t é o momento de inércia à torção uniforme;

$K_x L_x$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x;

$K_y L_y$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y;

$K_t L_t$ é o comprimento efetivo de flambagem por torção. Quando não houver garantia de impedimento ao empenamento, deve-se tomar K_t igual a 1,0.

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0 = [r_x^{\,2} + r_y^{\,2} + x_0^{\,2} + y_0^{\,2}]^{0,5}$$

Onde:

r_x; r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente;

x_0; y_0 são as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y, respectivamente, em relação ao centróide da seção.

7.7.2.2 Perfis monossimétricos

A força normal de flambagem elástica N_e de um perfil com seção monossimétrica, cujo eixo x é o eixo de simetria, é o menor valor entre os obtidos por a) e b) seguintes:

a) força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y:

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

b) bforça normal de flambagem elástica por flexo-torção:

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

Onde:

N_{ex}; N_{et} são as forças normais de flambagem elástica conforme 7.7.2.1-a) e 7.7.2.1-c),respectivamente;

r_0; x_0 conforme definidos em 7.7.2.1.

Caso o eixo y seja o eixo de simetria, substituir y por x em a); x por y e x_0 por y_0 em b)

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

7.7.2.3 Perfis assimétricos

A força normal de flambagem elástica N_e de um perfil com seção assimétrica é dada pela menor das raízes da seguinte equação cúbica:

$$r_0^2(N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{et}) - N_e^2(N_e - N_{ey})x_0^2 - N_e^2(N_e - N_{ex})y_0^2 = 0$$

Onde:

N_{ex}; N_{ey}; N_{et}; x_0; y_0; r_0 conforme definidos em 7.7.2.1.

7.7.3 Flambagem por distorção da seção transversal

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem por distorção, a força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada pelas expressões seguintes:

$$N_{c,Rd} = Af_y\,(1 - 0{,}25\lambda_{dist}^2)/\gamma \qquad \text{para } \lambda_{dist} < 1{,}414$$

$$N_{c,Rd} = Af_y\,\{0{,}055[\lambda_{dist} - 3{,}6]^2 + 0{,}237\}/\gamma \qquad \text{para } 1{,}414 \le \lambda_{dist} \le 3{,}6$$

Onde:

γ =1,1;

A é área bruta da seção transversal da barra;

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, dado por:

$$\lambda_{dist} = (f_y/\sigma_{dist})^{0,5}$$

σ_{dist} é a tensão convencional de flambagem elástica por distorção, calculada pela teoria da estabilidade elástica ou conforme anexo D.

7.7.4 Limitação de esbeltez

O índice de esbeltez KL/r das barras comprimidas não deve exceder 200.

7.7.5 Barras compostas comprimidas

Para barras compostas comprimidas, isto é, aquelas constituídas por um ou mais perfis associados, além de atender ao disposto em 7.7.4, o índice de esbeltez de cada perfil componente da barra deve ser inferior:

a) à metade do índice de esbeltez máximo do conjunto, para o caso de presilhas (chapas separadoras);

b) ao índice de esbeltez máximo do conjunto, para o caso de travejamento em treliça. Neste caso, o índice de esbeltez das barras do travejamento deve ser inferior a 140.

A substituição de travejamento em treliça por chapas regularmente espaçadas (talas), formando travejamento em quadro, não é prevista nesta Norma. Neste caso, a redução da força normal de compressão resistente de cálculo devida à deformação por cisalhamento não deve ser desprezada.

7.8 Barras submetidas à flexão simples

7.8.1 Momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor calculado em 7.8.1.1, 7.8.1.2 e 7.8.1.3 onde aplicável.

7.8.1.1 Início de escoamento da seção efetiva

$$M_{Rd} = W_{ef}\,f_y/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}1)$$

Onde:

W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2, com σ calculada para o estado limite último de escoamento da seção.

7.8.1.2 Flambagem lateral com torção

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

$$M_{Rd} = [\rho_{FLT}\,W_{c,ef}\,f_y]/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}1)$$

Onde:

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2, adotando $\sigma = \rho_{FLT}f_y$;

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

ρ_{FLT} é o fator de redução associado à flambagem lateral com torção, calculado por:

- para $\lambda_0 \leq 0,6$: $\rho_{FLT} = 1,0$
- para $0,6 < \lambda_0 < 1,336$: $\rho_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)$
- para $\lambda_0 \geq 1,336$: $\rho_{FLT} = 1/\lambda_0^2$

$\lambda_0 = (W_c f_y/M_e)^{0,5}$

W_c é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida;

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, que pode ser calculado pelas expressões seguintes, deduzidas para carregamento aplicado na posição do centro de torção. A favor da segurança, também podem ser empregadas nos casos de carregamento aplicado em posição estabilizante, isto é, que tende a restaurar a posição original da barra (por exemplo, carregamento gravitacional aplicado na parte inferior da barra). Em casos de carregamento aplicado em posição desestabilizante, consultar bibliografia especializada.

- barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x):

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{et})^{0,5}$$

- barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, consultar bibliografia especializada.

- barras com seção Z ponto-simétrica, com carregamento no plano da alma:

$$M_e = 0,5 C_b r_0 (N_{ey} N_{et})^{0,5}$$

- barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x:

$$M_e = C_b (N_{ey} G I_t)^{0,5}$$

N_{ey}; N_{et}; r_0 conforme 7.7.2.1, considerando $K_y L_y = L_y$ e $K_t L_t = L_t$. Valores de $K_y L_y$ e $K_t L_t$ inferiores a L_y e L_t, respectivamente, podem ser adotados, desde que justificados com base em bibliografia especializada. Para os balanços com a extremidade livre sem contenção lateral, $K_y L_y$ e $K_t L_t$ podem resultar maiores que L_y e L_t, respectivamente, em função das condições de vínculo, por exemplo, em barras contínuas conectadas apenas pela mesa tracionada, portanto com deslocamentos laterais, rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento parcialmente impedidos no apoio. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada.

C_b é o coeficiente de equivalência de momento na flexão, que a favor da segurança pode ser tomado igual a 1,0 ou calculado pela seguinte expressão:

$$C_b = \frac{12,5 M_{máx.}}{2,5 M_{máx.} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

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

Onde:

$M_{máx.}$ é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado;

M_A é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º. quarto do trecho analisado;

M_B é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado;

M_C é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º. quarto do trecho analisado.

7.8.1.3 Flambagem por distorção da seção transversal

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

$M_{Rd} = M_{dist}/\gamma \qquad (\gamma = 1,1)$

Onde:

M_{dist} é o momento fletor de flambagem por distorção, dado por:

- para $\lambda_{dist} < 1,414$: $M_{dist} = W_c f_y (1 - 0,25\lambda_{dist}^2)$
- para $\lambda_{dist} \geq 1,414$: $M_{dist} = W_c f_y / \lambda_{dist}^2$

W_c conforme definido em 7.8.1.2;

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem por distorção, dado por:

$\lambda_{dist} = (f_y/\sigma_{dist})^{0,5}$

σ_{dist} é a tensão convencional de flambagem elástica por distorção, calculada pela teoria da estabilidade elástica ou conforme anexo D.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Para as barras com a mesa tracionada conectada a um painel e a mesa comprimida livre (terças com telhas de aço parafusadas e sujeitas à ação de vento de sucção, por exemplo), o momento fletor resistente de cálculo, considerando o efeito da referida contenção lateral, pode ser calculado conforme anexo F.

7.8.2 Força cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por:

- para $h/t \leq 1{,}08(Ek_v/f_y)^{0,5}$

  $V_{Rd} = 0{,}6f_y ht/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}1)$

- para $1{,}08(Ek_v/f_y)^{0,5} < h/t \leq 1{,}4(Ek_v/f_y)^{0,5}$

  $V_{Rd} = 0{,}65t^2(k_v f_y E)^{0,5}/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}1)$

- para $h/t > 1{,}4(Ek_v/f_y)^{0,5}$

  $V_{Rd} = [0{,}905Ek_v t^3/h]/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}1)$

Onde:

t é a espessura da alma;

h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais:

  $k_v = 5{,}34$

- para alma com enrijecedores transversais satisfazendo as exigências de 7.5:

$$k_v = 4{,}0 + \frac{5{,}34}{(a/h)^2} \quad \text{para } a/h \leq 1{,}0$$

$$k_v = 5{,}34 + \frac{4{,}0}{(a/h)^2} \quad \text{para } a/h > 1{,}0$$

Onde:

a é a distância entre enrijecedores transversais de alma.

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

7.8.3 Momento fletor e força cortante combinados

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

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

Para barras com enrijecedores transversais de alma, além de serem atendidas as exigências de 7.8.1.1 e 7.8.2, quando $M_{Sd}/M_{0,Rd} > 0{,}5$ e $V_{Sd}/V_{Rd} > 0{,}7$, deve ser satisfeita a seguinte expressão de interação:

$$0{,}6(M_{Sd}/M_{0,Rd}) + (V_{Sd}/V_{Rd}) \leq 1{,}3$$

Onde:

M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{0,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo conforme 7.8.1.1;

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo conforme 7.8.2.

7.8.4 Barras compostas submetidas à flexão

O espaçamento s, na direção do eixo da barra, entre os parafusos ou soldas de ligação de dois perfis U, para formar um perfil I, não deve ser maior que o seguinte valor:

$$s_{máx.} = (2gF_{Rd})/(mq) \leq L/6$$

Onde:

L é o comprimento da barra;

g é a distância entre os parafusos ou soldas na direção perpendicular ao eixo da barra (ver figura 6). Se a ligação for executada junto às mesas dos perfis, g é igual à altura da barra;

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

F_{Rd} é a força resistente de cálculo do parafuso ou solda, correspondente ao tipo de esforço solicitante previsto no respectivo meio de ligação, conforme seção 8;

m é a distância do centro de torção de um perfil U ao plano médio da sua alma (ver figura 6);

q é o valor de cálculo da força uniformemente distribuída de referência, igual a três vezes o valor de cálculo da força uniformemente distribuída na barra; ou igual ao valor de cálculo da força concentrada dividido pelo comprimento de atuação desta força. Se o comprimento de atuação da força concentrada for inferior ao espaçamento dos parafusos ou soldas na direção do eixo da barra (s), a força resistente de cálculo do parafuso ou solda, junto à força concentrada, deve ser, no mínimo, $F_{Rd} = 0{,}5mF_{Sd}/g$;

F_{Sd} é o valor de cálculo da força concentrada que atua na barra.

Se for adotado espaçamento uniforme da conexão em toda a barra, o espaçamento máximo ($s_{máx.}$) deve ser determinado com base no maior valor da força concentrada atuante na barra. Caso contrário, o espaçamento da conexão deve ser determinado considerando-se a variação do carregamento ao longo da barra. Nas seções onde atuam elevadas forças concentradas, recomenda-se que a ligação seja feita por meio de chapas conectadas às mesas dos perfis.

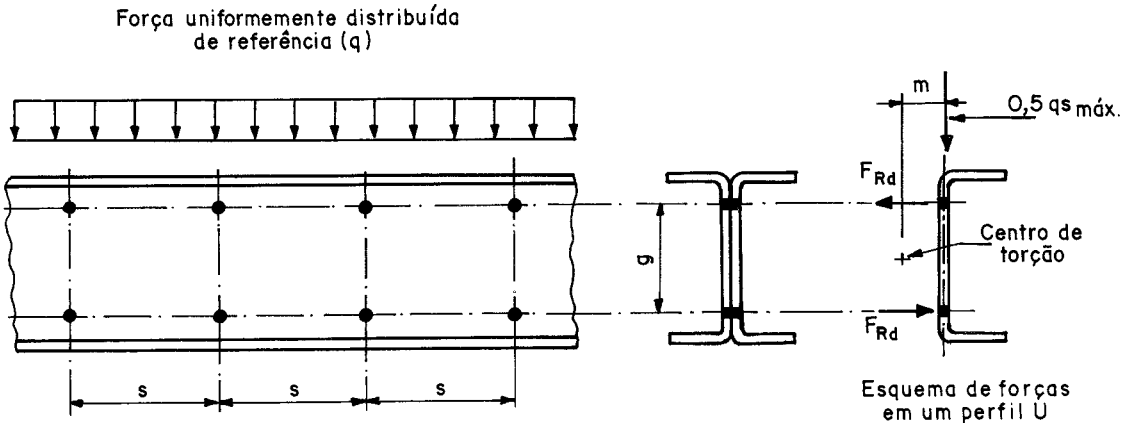


Figura 6 - Perfil I obtido pela composição de dois perfis U

7.9 Barras submetidas à flexão composta

7.9.1 Generalidades

A força normal solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem satisfazer as expressões de interação de 7.9.2 e 7.9.3.

7.9.2 Flexo-compressão

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{C_{mx} M_{x,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{c,Sd}}{N_{ex}}\right) M_{x,Rd}} + \frac{C_{my} M_{y,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{c,Sd}}{N_{ey}}\right) M_{y,Rd}} \leq 1{,}0$$

e

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{0,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1{,}0$$

Quando $N_{c,Sd}/N_{c,Rd} \leq 0{,}15$, as duas expressões anteriores podem ser substituídas por:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1{,}0$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ é a força normal de compressão solicitante de cálculo, considerada constante na barra;

$M_{x,Sd}$; $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente;

$N_{c,Rd}$ é a força normal de compressão resistente de cálculo, conforme 7.7;

$N_{0,Rd}$ é a força normal de compressão resistente de cálculo, calculada conforme 7.7, tomando-se $\rho = 1{,}0$;

$M_{x,Rd}$; $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados conforme 7.8.1 com $C_b = 1{,}0$.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

N_{ex}; N_{ey} são as forças normais de flambagem elástica, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculadas por:

$$N_{ex} = \pi^2 EI_x/(K_xL_x)^2 \quad ; \quad N_{ey} = \pi^2 EI_y/(K_yL_y)^2$$

Onde:

I_x; I_y são os momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos x e y, respectivamente;

(K_xL_x); (K_yL_y) são os comprimentos efetivos de flambagem em relação aos eixos x e y, respectivamente;

C_{mx}; C_{my} são os coeficientes de equivalência de momento na flexão composta, em relação aos eixos x e y, respectivamente, determinados conforme a), b) ou c) seguintes:

a) barras de estruturas indeslocáveis, sem ações transversais entre as extremidades:

$$C_m = 0{,}6 - 0{,}4(M_1/M_2)$$

Onde:

M_1 é o menor e M_2 o maior dos dois momentos fletores solicitantes de cálculo nas extremidades do trecho sem travamento lateral. A relação M_1/M_2 é positiva quando esses momentos provocarem curvatura reversa e negativa em caso de curvatura simples.

b) barras de estruturas indeslocáveis, sujeitas a ações transversais entre as extremidades.

Caso não sejam determinados de maneira mais precisa, os seguintes valores de C_m podem ser adotados:

1) para ambas as extremidades da barra engastadas: $C_m = 0{,}85$;

2) para os demais casos: $C_m = 1{,}0$;

c) barras de estruturas deslocáveis: $C_m = 1{,}0$.

Valores de C_m inferiores a 1,0 podem ser adotados, desde que justificados com base em bibliografia especializada.

7.9.3 Flexo-tração

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{xt,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{yt,Rd}} + \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1{,}0$$

e

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} - \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1{,}0$$

Onde:

$N_{t,Sd}$ é a força normal de tração solicitante de cálculo, considerada constante na barra;

$M_{x,Sd}$; $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente;

$N_{t,Rd}$ é a força normal de tração resistente de cálculo, conforme 7.6;

$M_{xt,Rd}$; $M_{yt,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados com base no escoamento da fibra tracionada da seção bruta, dados por $M_{xt,Rd} = W_{xt}f_y/\gamma$ e $M_{yt,Rd} = W_{yt}f_y/\gamma$ com $\gamma = 1{,}1$;

W_{xt}; W_{yt} são os módulos de resistência elásticos da seção bruta em relação aos eixos x e y, respectivamente, referentes à fibra tracionada;

$M_{x,Rd}$; $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente, conforme 7.8.1.

8 Requisitos para o dimensionamento de ligações

8.1 Condições gerais

Ligações consistem em elementos de ligação (enrijecedores, cobrejuntas, cantoneiras de assento, consoles, etc.) e meios de ligação (soldas e parafusos). Estes componentes devem ser dimensionados de forma que a resistência de cálculo da ligação seja igual ou superior aos máximos esforços solicitantes de cálculo, determinados com base nas combinações de ações para os estados limites últimos estabelecidos em 5.2, observando o disposto em a) e b).

a) barras axialmente solicitadas:

1) a ligação deve ser dimensionada, no mínimo, para 50% da força normal resistente de cálculo da barra, referente ao tipo de solicitação que comanda o dimensionamento da respectiva barra (tração ou compressão);

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

2) nas barras sem solicitação em análise linear, mas que têm influência na estabilidade global da estrutura (por exemplo, barras que reduzem o comprimento de flambagem de outras barras), a ligação deve ser dimensionada com base nos esforços solicitantes de cálculo determinados por análise não-linear ou determinados por critérios que permitam avaliar o efeito de segunda ordem. Na falta desta análise de estabilidade global, a ligação deve ser dimensionada, no mínimo, para 50% da força normal de compressão resistente de cálculo da barra;

b) nas ligações dimensionadas para uma combinação de dois ou mais esforços (por exemplo, ligação engastada viga-pilar), deve haver compatibilidade de dimensões entre as partes conectadas, os elementos de ligação e os meios de ligação correspondentes.

8.2 Ligações soldadas

8.2.1 Generalidades

Esta subseção é aplicável às ligações soldadas onde a espessura da parte mais fina não ultrapassa 4,75 mm. Caso contrário, devem ser atendidas as exigências da NBR 8800. Para os casos de ligações soldadas não previstos nesta Norma ou na NBR 8800, devem ser obedecidas as exigências da AWS D1.1 ou AWS D1.3.

8.2.2 Soldas de penetração em juntas de topo

A força resistente de cálculo de uma solda de penetração em junta de topo F_{Rd} deve ser calculada por:

a) tração ou compressão normal à seção efetiva ou paralela ao eixo da solda:

$F_{Rd} = Lt_{ef}f_y/\gamma$ ($\gamma = 1,1$)

b) cisalhamento na seção efetiva:

$F_{Rd} = Lt_{ef}(0,6f_w)/\gamma$ ($\gamma = 1,25$)

e

$F_{Rd} = Lt_{ef}(0,6f_y)/\gamma$ ($\gamma = 1,1$)

Onde:

f_w é a resistência à ruptura da solda;

f_y é a resistência ao escoamento do aço (metal-base);

L é o comprimento do cordão de solda;

t_{ef} é a dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de penetração. Para o caso de penetração total, t_{ef} é a menor espessura do metal-base na junta.

8.2.3 Soldas de filete em superfícies planas

A força resistente de cálculo de uma solda de filete em superfície plana F_{Rd} deve ser calculada por:

a) estado limite último de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda:

1) para $L/t < 25$:

$F_{Rd} = [1 - 0,01L/t]tLf_u/\gamma$ ($\gamma = 1,65$)

2) para $L/t \geq 25$:

$F_{Rd} = 0,75tLf_u/\gamma$ ($\gamma = 1,8$)

b) estado limite último de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda

$F_{Rd} = tLf_u/\gamma$ ($\gamma = 1,65$)

c) estado limite último de ruptura da solda: além das forças resistentes de cálculo obtidas em a) e b) anteriores, para espessura $t > 3,75$ mm, a força resistente de cálculo F_{Rd} não deve exceder o seguinte valor:

$F_{Rd} = 0,75t_{ef}Lf_w/\gamma$ ($\gamma = 1,65$)

Onde:

f_w é a resistência à ruptura da solda;

f_u é a resistência à ruptura do aço (metal-base);

L é o comprimento do filete de solda;

t é o menor valor entre t_1 e t_2 conforme figura 7;

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

t_{ef} é a dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de filete, considerada como o menor valor entre $0,7w_1$ ou $0,7w_2$;

w_1, w_2 são as pernas do filete, conforme figura 7. Nas juntas por sobreposição, $w_1 \leq t_1$.

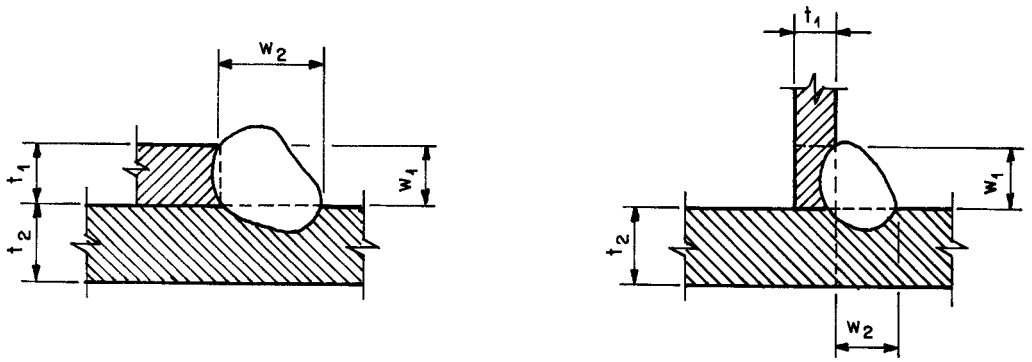


Figura 7 - Solda de filete em superfícies planas

8.2.4 Soldas de filete em superfícies curvas

A força resistente de cálculo de uma solda de filete em superfícies curvas F_{Rd} deve ser calculada por:

a) estado limite último de ruptura do metal-base: solicitação normal ao eixo da solda [figura 8-a)]:

$F_{Rd} = 0,83tLf_u/\gamma$ ($\gamma = 1,8$)

b) estado limite último de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda [figuras 8-b) a 8-g)]:

1) para $t_{ef} \geq 2t$ e se a dimensão h do enrijecedor é maior ou igual ao comprimento da solda L [figura 8-d)]:

$F_{Rd} = 1,50tLf_u/\gamma$ ($\gamma = 1,8$)

2) para $t \leq t_{ef} < 2t$ ou se a dimensão h do enrijecedor é menor que o comprimento da solda L [figura 8-e)]:

$F_{Rd} = 0,75tLf_u/\gamma$ ($\gamma = 1,8$)

c) estado limite último de ruptura da solda: além das forças resistentes de cálculo obtidas em a) e b) anteriores, para espessura t > 3,75 mm, a força resistente de cálculo F_{Rd} não deve exceder o seguinte valor:

$F_{Rd} = 0,75t_{ef}Lf_w/\gamma$ ($\gamma = 1,65$)

Onde:

f_w é a resistência à ruptura da solda;

f_u é a resistência à ruptura do aço (metal-base);

h é a altura do enrijecedor;

L é o comprimento do filete de solda;

t é espessura do metal-base conforme figuras 8-a) a 8-g);

r_e é o raio externo de dobramento conforme figuras 8-d) a 8-g);

t_{ef} é a dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de filete, dada por:

- face externa do filete rente ao metal-base [figuras 8-d) e 8-e)]:

1) solda em apenas uma superfície curva: $t_{ef} = 0,3r_e$;

2) solda em duas superfícies curvas: $t_{ef} = 0,5r_e$ (para $r_e > 12,5$ mm, $t_{ef} = 0,37r_e$);

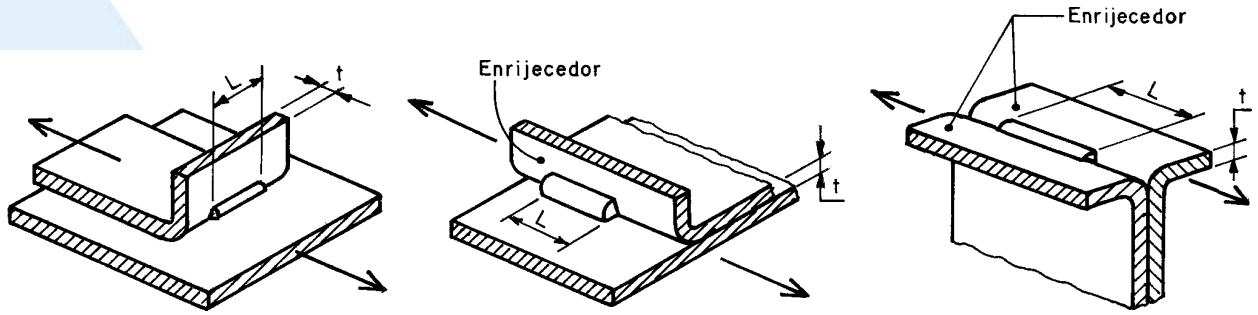
- face externa do filete saliente ao metal base [figuras 8-f) e 8-g)]:

$0,7w_1$ ou $0,7w_2$ (o menor valor)

Valores de t_{ef} maiores que os estabelecidos anteriormente podem ser adotados, desde que comprovados por medições.

w_1, w_2 são as pernas do filete, conforme figuras 8-d) a 8-g).

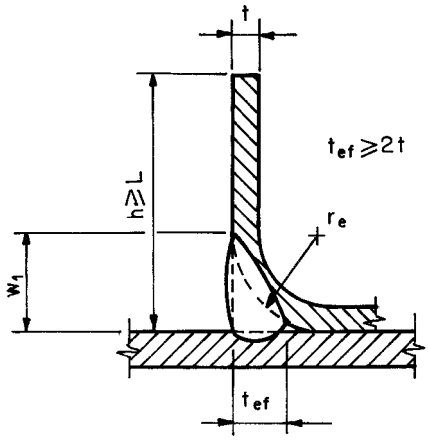
Licença de uso exclusiva para Petrobras S.A.



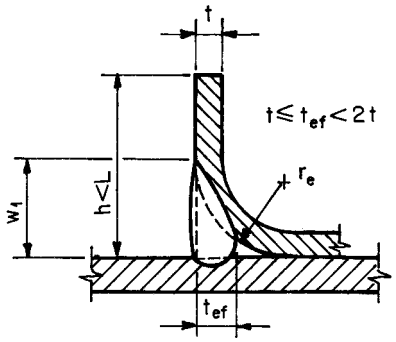
a) file transversal

b) filete longitudinal em uma superfície curva

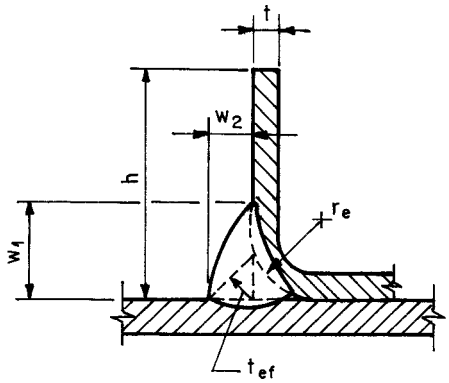
c) filete longitudinal em duas superfícies curvas



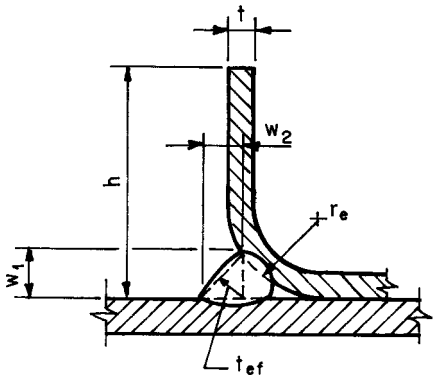
d) face do filete rente ao metal base ($w_1 = r_e$)



e) face do filete rente ao metal base ($w_1 = r_e$)



f) face do filete saliente ao metal-base ($w_1 > r_e$)



g) face do filete saliente ao metal-base (w_1 , r_e)

Figura 8 - Solda de filete em superfícies curvas

8.3 Ligações parafusadas

8.3.1 Generalidades

Esta subseção é aplicável às ligações parafusadas onde a espessura da parte mais fina não ultrapassa 4,75 mm. Caso contrário, devem ser atendidas as exigências da NBR 8800.

8.3.2 Dimensões dos furos

As dimensões dos furos para introdução dos parafusos não devem exceder as especificadas na tabela 9. Nas estruturas em geral, devem ser especificados furos-padrão. Nas ligações cuja solicitação seja normal ao eixo dos parafusos (força cortante), caso sejam especificados furos alongados ou muito alongados, a dimensão alongada do furo deve ser normal à solicitação.

Tabela 9 - Dimensões máximas de furos

Dimensões em milímetros

Diâmetro nominal do parafuso (d)	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
< 12,5	d + 0,8	d + 1,5	(d + 0,8) x (d + 6)	(d + 0,8) x (2,5d)
≥ 12,5	d + 1,5	d + 5	(d + 1,5) x (d + 6)	(d + 1,5) x (2,5d)

8.3.3 Disposições construtivas

8.3.3.1 Espaçamentos mínimos

A distância livre entre as bordas de dois furos adjacentes não deve ser inferior a *2d*, e a distância da borda de um furo à extremidade do elemento conectado não deve ser inferior a *d*, onde *d* é o diâmetro nominal do parafuso.

8.3.3.2 Espaçamentos máximos

Em ligações constituídas por cobrejuntas sujeitas à compressão, a distância entre os centros de dois parafusos adjacentes ou entre o centro do parafuso à borda da cobrejunta, na direção da solicitação, deve ser inferior a $1{,}37t(E/f_y)^{0,5}$, onde *t* é a espessura da cobrejunta e f_y é a resistência ao escoamento do aço da cobrejunta.

8.3.4 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda

A força resistente de cálculo ao rasgamento F_{Rd} deve ser calculada por:

$F_{Rd} = tef_u/\gamma$ (γ = 1,35)

Onde:

f_u é a resistência à ruptura do aço (metal-base);

t é a espessura do elemento conectado analisado;

e é a distância, tomada na direção da força, do centro do furo-padrão à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade do elemento conectado.

8.3.5 Pressão de contato (esmagamento)

A força resistente de cálculo ao esmagamento F_{Rd} deve ser calculada por:

$F_{Rd} = 2{,}4dtf_u/\gamma$ (γ = 1,35)

Onde:

f_u é a resistência à ruptura do aço (metal-base);

d é o diâmetro nominal do parafuso;

t é a espessura do elemento conectado analisado.

8.3.6 Força normal de tração no parafuso

A força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ do parafuso deve ser calculada por:

$N_{t,Rd} = 0{,}75A_pf_{up}/\gamma$

Onde:

A_p é a área bruta da seção transversal do parafuso;

f_{up} é a resistência à ruptura do parafuso na tração, conforme tabela 10 ou o disposto em 4.4;

γ = 1,35 para parafusos de alta resistência;

γ = 1,55 para os parafusos comuns e parafusos de aço sem qualificação estrutural.

8.3.7 Força cortante no parafuso

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} do parafuso, por plano de corte, deve ser calculada por:

$V_{Rd} = 0{,}45A_pf_{up}/\gamma$, quando plano de corte passa pela rosca

$V_{Rd} = 0{,}6A_pf_{up}/\gamma$, quando plano de corte não passa pela rosca

Onde:

A_p; f_{up} conforme definidos em 8.3.6;

γ = 1,55 para parafusos de alta resistência;

γ = 1,65 para os parafusos comuns e parafusos de aço sem qualificação estrutural.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

8.3.8 Força normal de tração e força cortante combinadas no parafuso

Para os parafusos submetidos à força normal de tração e força cortante simultaneamente, além de verificar os esforços isoladamente, conforme 8.3.6 e 8.3.7, deve ser satisfeita a seguinte condição:

- parafusos de aço com qualificação estrutural, comuns ou de alta resistência:

$$(N_{t,Sd}/N_{t,Rd}) + (V_{Sd}/V_{Rd}) \leq 1{,}25$$

- parafusos de aço sem qualificação estrutural:

$$(N_{t,Sd}/N_{t,Rd}) + (V_{Sd}/V_{Rd}) \leq 1{,}0$$

Onde:

$N_{t,Sd}$ é a força normal de tração solicitante de cálculo no parafuso;

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo no parafuso, no plano de corte analisado;

$N_{t,Rd}$ é a força normal de tração resistente de cálculo do parafuso, conforme 8.3.6;

V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo do parafuso, conforme 8.3.7.

Tabela 10 - Resistência à ruptura na tração de parafusos de aço com qualificação estrutural

Especificação	Tipo	Diâmetro nominal do parafuso *d* mm	Resistência à ruptura do parafuso na tração f_{up} MPa
ASTM A307 - grau A	Comum	6,3 ≤ d < 12,5 d ≥ 12,5	370 415
ISO 898 - grau 4.6	Comum	d ≥ 6,0	400
ASTM A325	Alta resistência	12,5 ≤ d ≤ 38	825
ASTM A354 (grau BD)	Alta resistência	d ≥ 6,3	1 035
ASTM A394 (tipo 0) ASTM A394 (tipos 1,2 e 3)	Comum Alta resistência	12,5 ≤ d ≤ 25 12,5 ≤ d ≤ 25	510 825
ASTM A 449	Alta resistência	d ≥ 6,3	825
ASTM A490	Alta resistência	12,5 ≤ d ≤ 38	1 035
ISO 7411 - grau 8.8	Alta resistência	d ≥ 6,0	800
ISO 7411 - grau 10.9	Alta resistência	d ≥ 6,0	1 000

8.4 Ruptura por rasgamento da parte conectada

Nas ligações de extremidade de vigas, onde apenas uma ou as duas mesas são recortadas [ver figura 9-a)], em cantoneiras tracionadas [ver figura 9-b)] ou em outros casos de ligações onde houver a possibilidade de ruptura por rasgamento da parte conectada, a força resistente de cálculo F_{Rd} deve ser calculada por:

para $A_{nt}f_u \geq 0{,}6A_{nv}f_u$

$$F_{Rd} = (0{,}6A_{gv}f_y + A_{nt}f_u)/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}35)$$

para $0{,}6A_{nv}f_u \geq A_{nt}f_u$

$$F_{Rd} = (0{,}6A_{nv}f_u + A_{gt}f_y)/\gamma \qquad (\gamma = 1{,}35)$$

Onde:

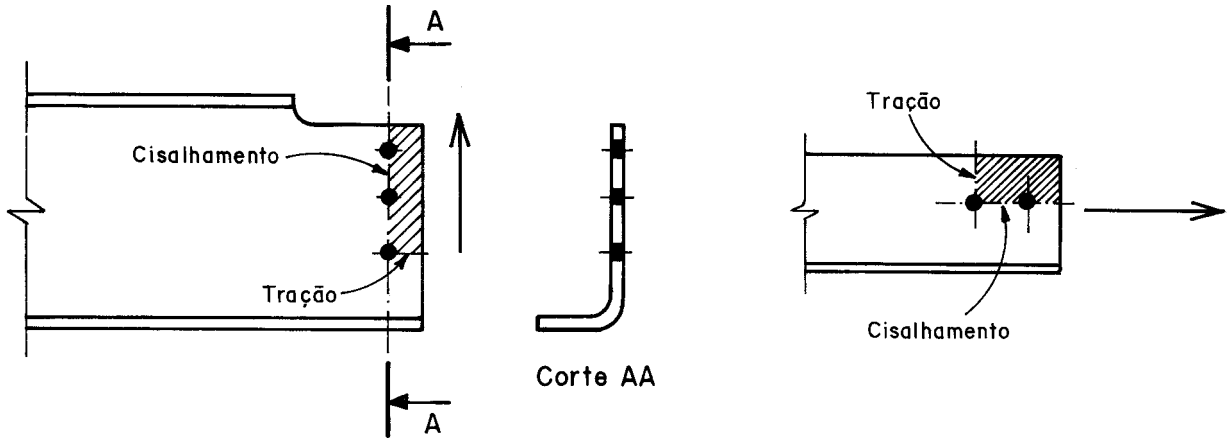
A_{gt} é a área bruta sujeita à tração, da parte susceptível à ruptura por rasgamento;

A_{gv} é área bruta sujeita ao cisalhamento, da parte susceptível à ruptura por rasgamento;

A_{nt} é a área líquida sujeita à tração, da parte susceptível à ruptura por rasgamento;

A_{nv} é a área líquida sujeita ao cisalhamento, da parte susceptível à ruptura por rasgamento.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.



a) extremidade de viga **b) cantoneira tracionada**

Figura 9 - Ruptura por rasgamento da parte conectada

8.5 Pressão de contato sobre apoios de concreto

A força normal de compressão resistente de cálculo, referente à pressão de contato sobre apoios de concreto, deve ser determinada conforme 7.6.1.4 da NBR 8800:1986.

9 Dimensionamento com base em ensaios

9.1 Aplicação

Esta seção é aplicável aos casos de avaliação do desempenho estrutural e determinação dos esforços resistentes de cálculo de barras, ligações ou conjuntos estruturais, que não são previstos nas seções 7 e 8.

9.2 Condições para execução de ensaios

Os ensaios devem ser feitos por laboratórios idôneos, adequadamente equipados e por profissionais com comprovada experiência na preparação e execução dos ensaios.

A definição dos protótipos e a montagem do aparato de ensaio, envolvendo a vinculação do protótipo, o carregamento e a maneira de se aplicar o carregamento, devem ser coerentes com as condições de serviço da estrutura.

9.3 Resposta estrutural

Nos ensaios são determinadas as ações aplicadas (forças, momentos, deslocamentos, variações de temperatura, etc.) correspondentes aos estados limites últimos estabelecidos em cada caso. Para a determinação dos efeitos das ações, necessários para o dimensionamento, os esforços resistentes de cálculo devem ser obtidos mediante o emprego de modelos teóricos coerentes com os empregados em projeto.

9.4 Emissão de relatório

Os registros das informações pertinentes aos ensaios devem ser feitos em relatórios técnicos, devendo constar, no mínimo, as seguintes informações:

a) descrição dos protótipos ensaiados, com detalhes e dimensões;

b) descrição do aparato de ensaio, com informações detalhadas sobre aplicação do carregamento e vinculação do protótipo;

c) descrição dos equipamentos e instrumentos de medição utilizados, constando fabricante, modelo, capacidade, sensibilidade, precisão, etc.;

d) resultados das medições de todas as etapas de carregamento e descarregamento;

e) demais informações relevantes provenientes de observações dos ensaios, como, por exemplo, ocorrências de deslocamentos, vibrações, etc., que podem exceder os valores máximos recomendados para estados limites de utilização.

9.5 Análise dos resultados

O valor característico do esforço resistente (N_{Rk}, M_{Rk} ou V_{Rk}) deve ser tomado como o valor médio obtido de todos os ensaios válidos e o respectivo coeficiente de variação δ_t deve ser determinado por análise estatística.

No mínimo devem ser ensaiados três protótipos idênticos, sendo que o desvio de um resultado qualquer em relação ao valor médio não pode ser maior que 15% (para mais ou para menos).

Caso tal desvio seja superior a 15% (para mais ou para menos), mais ensaios idênticos devem ser feitos até que o desvio de qualquer resultado em relação ao valor médio de todos os ensaios não exceda 15% (para mais ou para menos), ou até que no mínimo mais três ensaios sejam feitos.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Nenhum resultado de ensaio deve ser desprezado, com exceção dos casos onde fiquem comprovadas falhas na montagem e/ou realização do respectivo ensaio.

O esforço resistente de cálculo (N_{Rd}, M_{Rd} ou V_{Rd}) deve ser calculado pela relação entre o esforço resistente característico e o coeficiente de ponderação da resistência γ dado por:

a) vigas com a mesa tracionada conectada a painel:

$$\gamma = 1/\left[1{,}6(X_m X_f)e^{-\beta_0\sqrt{\delta_m^2+\delta_f^2+C_p\delta_t^2+0{,}185}}\right]$$

b) demais casos:

$$\gamma = 1/\left[1{,}5(X_m X_f)e^{-\beta_0\sqrt{\delta_m^2+\delta_f^2+C_p\delta_t^2+0{,}044}}\right]$$

Onde:

e é a base do logaritmo natural, igual a 2,718...

C_p é o fator de correção, dado por:

- para $n \geq 4$: $C_p = m(1 + 1/n)/(m - 2)$;

- para $n = 3$: $C_p = 5{,}7$;

n é o número de ensaios;

m é o grau de liberdade, igual a n - 1;

X_f é o valor médio do fator fabricação, conforme tabela 11;

X_m é o valor médio do fator material, conforme tabela 11;

β_0 é o índice de confiabilidade alvo, dado por:

β_0 = 1,5 para vigas com a mesa tracionada conectada a painel;

β_0 = 2,5 para barras;

β_0 = 3,5 para ligações;

δ_t é o coeficiente de variação obtido nos ensaios (relação entre o desvio-padrão e o valor médio), tomado sempre maior ou igual a 6,5%;

δ_f é o coeficiente de variação do fator fabricação, conforme tabela 11;

δ_m é o coeficiente de variação do fator material, conforme tabela 11.

Tabela 11 - Dados estatísticos para determinação do coeficiente de ponderação da resistência

Caso em análise	X_m	δ_m	X_f	δ_f
Barras submetidas à tração ou à compressão	1,10	0,10	1,00	0,05
Barras submetidas à flexão simples:				
- Momento fletor: barras estáveis lateralmente	1,10	0,10	1,00	0,05
- Flambagem lateral com torção	1,00	0,06	1,00	0,05
- Painel conectado à mesa tracionada	1,10	0,10	1,00	0,05
- Força cortante	1,10	0,10	1,00	0,05
- Momento fletor e força cortante combinados	1,10	0,10	1,00	0,05
Enrijecedores transversais de alma: força concentrada	1,10	0,10	1,00	0,05
Enrijecedores transversais de alma: força cortante	1,00	0,06	1,00	0,05
Barras submetidas à flexão composta	1,05	0,10	1,00	0,05
Força concentrada em seções sem enrijecedores transversais	1,10	0,10	1,00	0,05
Perfis com seção transversal tubular	1,10	0,10	1,00	0,05
Painéis em geral submetidos à compressão ou flexão simples	1,10	0,10	1,00	0,05
Painéis em geral submetidos à flexão composta	1,05	0,10	1,00	0,05

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela 11 (conclusão)

Caso em análise	X_m	δ_m	X_f	δ_f
Ligações soldadas:				
- Solda de filete em superfícies planas: ruptura da solda	1,10	0,10	1,00	0,10
- Solda de filete em superfícies planas: ruptura do metal-base	1,10	0,08	1,00	0,15
- Solda de filete em superfícies curvas	1,10	0,10	1,00	0,10
- Solda de tampão em furos: ruptura da solda	1,10	0,10	1,00	0,10
- Solda de tampão em furos: ruptura do metal-base	1,10	0,08	1,00	0,15
- Solda de tampão em rasgos: ruptura da solda ou metal-base	1,10	0,10	1,00	0,10
- Solda de resistência	1,10	0,10	1,00	0,10
Ligações parafusadas:				
- Rasgamento entre furos ou entre furo e borda	1,10	0,08	1,00	0,05
- Pressão de contato (esmagamento)	1,10	0,08	1,00	0,05
- Ruptura por tração na seção líquida	1,10	0,08	1,00	0,05
Ligações parafusadas com parafusos auto-atarraxantes ou autoperfurantes:				
- Rasgamento entre furos ou entre furo e borda	1,10	0,10	1,00	0,10
- Pressão de contato (esmagamento)	1,10	0,10	1,00	0,10
- Ruptura por tração na seção líquida	1,10	0,10	1,00	0,10

/ANEXO A

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Anexo A (normativo)
Deslocamentos limites

A.1 Generalidades

Neste anexo são apresentados deslocamentos limites recomendados para casos freqüentes nas construções (ver tabela A.1), os quais são valores práticos utilizados para verificação do estado limite de deslocamentos excessivos da estrutura, devendo ser entendidos como recomendação geral de projeto. Os deslocamentos limites podem ser alterados em função do tipo e da utilização da construção. Por exemplo, para edifícios, no todo ou em parte, sensíveis a deslocamentos, tais valores podem ser reduzidos, enquanto que para construções provisórias podem ser aumentados.

A.2 Requisitos

As combinações de ações para o cálculo dos deslocamentos na estrutura devem atender aos critérios de combinações raras para os estados limites de utilização estabelecidos em 5.3-c).

Exceto quando limites específicos para cada utilização forem estabelecidos entre o cliente e o projetista, os valores limites apresentados na tabela A.1 devem ser aplicados.

Atender aos valores de deslocamentos limites apresentados na tabela A.1 não exclui a necessidade de verificar possíveis estados limites referentes a vibrações excessivas.

Em vigas, deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas. No cálculo da flecha total não deve ser considerado valor de contraflecha superior à flecha proveniente das ações permanentes.

Tabela A.1 - Deslocamentos limites recomendados[1)]

Descrição	d_1	d_2	Exemplos de combinações[2), 3)]
- Terças e longarinas de fechamento em geral[4), 5)]	L/180	-	F_G
Longarinas de fechamento em geral[6)]	-	L/120	F_{Q1}
Longarinas suportando fechamentos sujeitos à fissuração e/ou componentes sensíveis a deslocamentos excessivos	-	L/180	F_{Q1}
- Terças em geral[5)]	L/180	-	$F_G + F_{Q2} + 0{,}2F_{Q1}$
- Terças suportando fechamentos sujeitos à fissuração e/ou componentes sensíveis a deslocamentos excessivos[5)]	-	L/250	$F_{Q1} + 0{,}3F_{Q2}$ $F_{Q2} + 0{,}2F_{Q1}$
- Treliças e vigas de cobertura em geral[5)]	L/250	-	$F_G+F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}+0{,}2F_{Q1}$ $F_G+F_{Q3}+0{,}3F_{Q2}+0{,}2F_{Q1}$
		L/180	F_{Q1}
- Vigas de piso em geral	L/300	-	$F_G+F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}$ $F_G+F_{Q3}+\psi_1F_{Q2}$[7)]
	-	L/350	$F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}$ $F_{Q3}+\psi_1F_{Q2}$[7)]
- Vigas de piso suportando acabamentos sujeitos à fissuração (alvenarias, painéis rígidos, etc.) e esquadrias	L/350	-	$F_G+F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}$ $F_G+F_{Q3}+\psi_1F_{Q2}$[7)]
	-	L/400	$F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}$ $F_{Q3}+\psi_1F_{Q2}$[7)]
- Vigas de piso suportando pilares	L/400	-	$F_G+F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}$ $F_G+F_{Q3}+\psi_1F_{Q2}$[7)]
	-	L/500	$F_{Q2}+0{,}4F_{Q3}$ $F_{Q3}+\psi_1F_{Q2}$[7)]
Galpões em geral e edifícios de um pavimento: - Deslocamento horizontal do topo em relação à base[6)]	-	H/300	$F_{Q1} + 0{,}3F_{Q2} + 0{,}4F_{Q3}$ $F_{Q3} + 0{,}2F_{Q1} + 0{,}3F_{Q2}$

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela A.1 (conclusão)

Edifícios de dois ou mais pavimentos:			
- Deslocamento horizontal do topo em relação à base[6)]	-	H/400	$F_{Q1} + \psi_1 F_{Q2}$[7)]
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	-	h/300	$F_{Q1} + \psi_1 F_{Q2}$[7)]

[1)] L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base), h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos), d_1 é o deslocamento referente à combinação de todas as ações e d_2 é o deslocamento referente à combinação das ações variáveis.

[2)] F_G são as ações permanentes; F_{Q1} é a ação do vento; F_{Q2} é a sobrecarga no telhado ou piso e F_{Q3} são as ações provenientes de equipamentos de elevação e transporte.

[3)] As ações variáveis favoráveis não devem ser consideradas na combinação.

[4)] Deslocamentos entre linhas de correntes, no plano das mesmas.

[5)] Em telhados com pequena declividade, o deslocamento limite também deve ser adotado de maneira a se evitar a ocorrência de empoçamento.

[6)] No caso de paredes de alvenaria, limitar o deslocamento horizontal (perpendicular à parede), de maneira que a abertura da fissura que possa ocorrer na base da parede não seja superior a 2,0 mm, entendida a parede como painel rígido (figura A.1).

[7)] ψ_1 é o fator de utilização referente ao valor freqüente da sobrecarga, conforme tabela 2.

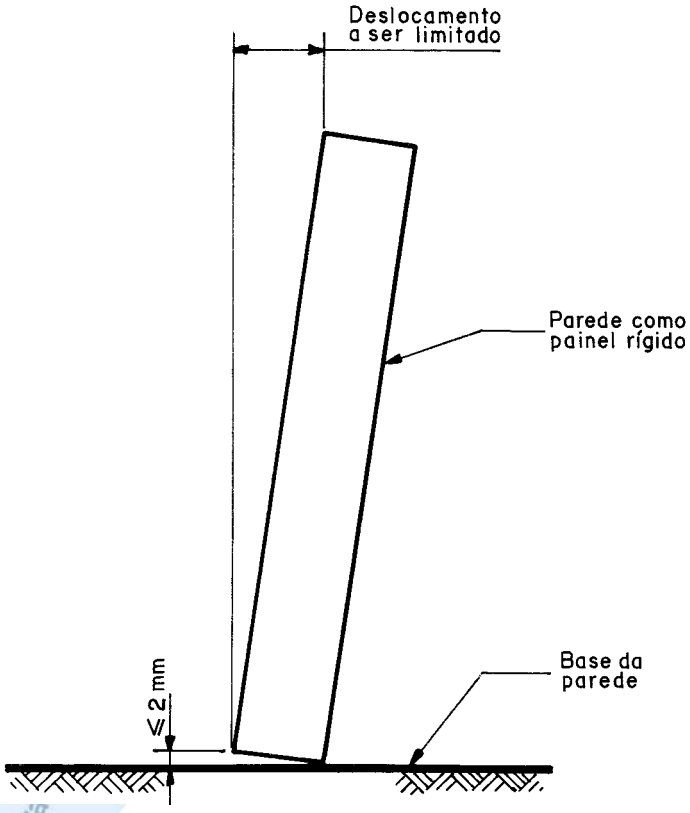


Figura A.1 - Parede como painel rígido

/ANEXO B

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Anexo B (normativo)
Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio

B.1 Generalidades

A resistência ao escoamento do aço modificada f_{ya}, para uma determinada seção transversal, pode ser utilizada em substituição à resistência ao escoamento do aço virgem f_y, ficando esta possibilidade restrita às prescrições estabelecidas em 7.2.3, 7.6, 7.7, 7.8.1 e 7.9.

B.2 Requisitos

As limitações e o procedimento para a determinação de f_{ya} são apresentados a seguir:

a) para barras submetidas à compressão e à flexão constituídas por seções onde todos os elementos apresentam $\lambda_p \leq$ 0,673 calculado com f_y conforme 7.2, a resistência ao escoamento modificada f_{ya} deve ser determinada com base em um dos seguintes procedimentos:

1) ensaios de tração em corpos-de-prova constituídos por segmentos da barra (ensaio na seção total), conforme B.3;

2) ensaios de compressão em corpos-de-prova constituídos por segmentos da barra (ensaio na seção total) conforme B.3;

3) calculada como indicado a seguir:

$$f_{ya} = Cf_{yc} + (1 - C)f_{yf}$$

Onde:

f_{ya} é a resistência ao escoamento do aço modificada;

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

f_{yf} é a resistência ao escoamento média das partes planas de uma seção estabelecida por ensaios, conforme B.3-e), ou a resistência ao escoamento do aço virgem f_y na ausência de ensaios;

f_{yc} é a resistência ao escoamento para a região das dobras, avaliada por:

$$f_{yc} = \frac{B_c f_y}{(r_i / t)^m}$$

A expressão anterior é aplicável somente quando $f_u/f_y \geq 1{,}2$; $r_i/t \leq 7$ e o ângulo de dobramento for igual ou inferior a 120°.

$$B_c = 3{,}69(f_u/f_y) - 0{,}819(f_u/f_y)^2 - 1{,}79$$

$$m = 0{,}192(f_u/f_y) - 0{,}068$$

Onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço virgem;

f_u é a resistência à ruptura do aço virgem;

r_i é o raio interno de dobramento;

t é a espessura.

b) para barras submetidas à tração, a resistência ao escoamento do aço modificada f_{ya} deve ser determinada por ensaios de tração na seção total conforme B.3 ou calculada conforme B.2-a)3).

B.3 Ensaios

Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas de uma seção (ensaios na seção total) devem atender ao disposto nas alíneas *a)* a *d)*, onde aplicável. Os ensaios para a determinação da resistência ao escoamento média das partes planas de uma seção f_{yf} deve atender ao disposto na alínea *e)*:

a) quando as propriedades mecânicas da seção forem obtidas por ensaios na seção total, conforme B.3-b), B.3-c) ou B.3-d), pelo menos dois ensaios devem ser feitos por lote de no máximo 50 t de cada perfil, ou pelo menos um ensaio por lote de no máximo 30 t de cada perfil, sendo o lote definido como uma quantidade de aço proveniente de uma mesma corrida de produção;

b) as propriedades mecânicas da seção total, submetidas à tração, devem ser determinadas conforme ASTM A370;

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

c) as propriedades mecânicas da seção total, submetidas à compressão, devem ser determinadas com base em ensaios de corpos-de-prova constituídos por segmentos da barra, cujo comprimento deve ser maior ou igual a três vezes a maior dimensão da seção e inferior a 20 vezes o raio de giração mínimo da seção bruta;

d) para os perfis que serão solicitados predominantemente à flexão, os ensaios de tração ou compressão na seção total, conforme B.3-b) ou B.3-c) respectivamente, devem ser realizados em corpos-de-prova constituídos pela mesa mais a porção de alma adjacente definida de maneira que $\lambda_p \leq 0{,}673$;

e) a resistência ao escoamento média das partes planas de uma seção f_{yf}, prevista em B.2, pode ser adotada como sendo a resistência ao escoamento do aço virgem, ou pode ser tomada como a média ponderada das resistências ao escoamento obtidas em ensaios de tração conforme ASTM A370, em corpos-de-prova extraídos de todas as partes planas da seção. A média ponderada deve ser calculada pela soma dos produtos da resistência ao escoamento média de cada parte plana pela área respectiva, dividida pela soma das áreas de todas as partes planas da seção. Para cada parte plana da seção deve ser confeccionado, no mínimo, um corpo-de-prova extraído do seu centro.

/ANEXO C

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Anexo C (normativo)
Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedores de borda e enrijecedores intermediários, ou elementos com mais de um enrijecedor intermediário

Para o cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda e enrijecedores intermediários, ou elementos com mais de um enrijecedor intermediário, os enrijecedores intermediários devem ser desprezados, a menos que possuam momento de inércia I_s igual ou maior que o momento de inércia mínimo I_{min} seguinte:

$$I_{min} = 3{,}66t^4\,[(b/t)^2 - 0{,}136E/f_y]^{0,5} \geq 18{,}4t^4$$

Onde:

b/t é a relação largura-espessura do maior subelemento;

I_s é o momento de inércia da seção total do enrijecedor em relação ao seu eixo principal paralelo ao elemento a ser enrijecido.

Também devem ser atendidas as exigências seguintes:

a) se o espaçamento dos enrijecedores intermediários entre duas almas é tal que, para subelementos entre enrijecedores, $b_{ef} < b$, conforme 7.2.1, somente dois enrijecedores intermediários (os mais próximos de cada alma) devem ser considerados efetivos;

b) se o espaçamento dos enrijecedores intermediários entre uma alma e um enrijecedor de borda é tal que, para subelementos entre enrijecedores, $b_{ef} < b$, conforme 7.2.1, somente um enrijecedor intermediário (o mais próximo da alma) deve ser considerado efetivo;

c) se o espaçamento entre enrijecedores intermediários é tal que, para subelementos entre enrijecedores, $b_{ef} = b$, conforme 7.2.1, todos os enrijecedores podem ser considerados efetivos. No cálculo da relação largura-espessura do elemento com enrijecedores intermediários, tal elemento pode ser substituído por um "elemento equivalente" sem enrijecedores intermediários, cuja largura b_o é a sua própria largura e a espessura equivalente t_{eq} é determinada como indicado a seguir:

$$t_{eq} = (12I_{sf}/b_o)^{0,33}$$

Onde:

I_{sf} é o momento de inércia da seção bruta do elemento com enrijecedores intermediários (incluindo os enrijecedores intermediários) em relação ao seu próprio eixo principal. O momento de inércia do perfil deve ser calculado assumindo o "elemento equivalente" localizado no centróide do elemento com enrijecedores intermediários (elemento real). A distância real da fibra extrema ao centróide deve ser usada no cálculo do módulo de resistência elástico da seção.

d) se $b/t > 60$, deve ser usada uma largura efetiva reduzida $b_{ef,r}$ do subelemento, determinada pela seguinte expressão:

$$b_{ef,r} = b_{ef} - 0{,}1t(b/t - 60)$$

Onde:

$b_{ef,r}$ é a largura efetiva reduzida do subelemento;

b/t é a relação largura-espessura do subelemento;

b_{ef} é a largura efetiva determinada conforme 7.2.1.

No cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil com subelementos comprimidos sujeitos à redução na largura efetiva, conforme indicado anteriormente, a área dos enrijecedores de borda ou intermediários deve ser considerada reduzida a uma área efetiva A_{ef} determinada como indicado a seguir:

1) para $60 < b/t < 90$:

$$A_{ef} = A_{st}\,[(3 - 2b_{ef,r}/b) - (b/t)(1 - b_{ef,r}/b)/30]$$

2) para $b/t \geq 90$:

$$A_{ef} = (b_{ef,r}/b)A_{st}$$

Onde:

A_{st} é a área bruta do enrijecedor de borda ou intermediário.

Nas expressões anteriores, A_{ef} e A_{st} referem-se somente à área da seção do enrijecedor, excluindo qualquer parte de elementos adjacentes.

O centróide e o momento de inércia do enrijecedor devem ser assumidos em relação à sua seção bruta.

/ANEXO D

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Anexo D (normativo)
Flambagem por distorção da seção transversal

D.1 Generalidades

Este anexo é aplicável às barras com seção transversal aberta e sujeitas à flambagem por distorção da seção transversal. O valor da tensão convencional de flambagem elástica por distorção σ_{dist} pode ser calculado pelas expressões seguintes, ou por meio de cálculos com base na teoria da estabilidade elástica.

D.2 Seções do tipo U enrijecido com enrijecedores de borda adicionais (seções do tipo *rack*, por exemplo), submetidas à compressão uniforme

As expressões seguintes são aplicáveis às seções transversais com relação b_f/b_w (ver figura D.1) compreendida entre 0,6 e 1,3.

$$\sigma_{dist} = (0{,}5E/A_d)\{\alpha_1 + \alpha_2 - [(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4\alpha_3]^{0,5}\} \quad \text{(D.1)}$$

Onde:

$$\alpha_1 = (\eta/\beta_1)(\beta_2 + 0{,}039 I_t L_d^{\,2}) + k_\phi(\beta_1 \eta E) \quad \text{(D.2)}$$

$$\alpha_2 = \eta(I_y - 2\, y_o \beta_3/\beta_1) \quad \text{(D.3)}$$

$$\alpha_3 = \eta(\alpha_1 I_y - \eta \beta_3^{\,2}/\beta_1) \quad \text{(D.4)}$$

$$\beta_1 = h_x^{\,2} + (I_x + I_y)/A_d \quad \text{(D.5)}$$

$$\beta_2 = C_w + I_x(x_o - h_x)^2 \quad \text{(D.6)}$$

$$\beta_3 = I_{xy}\,(x_o - h_x) \quad \text{(D.7)}$$

$$\beta_4 = \beta_2 + (y_o - h_y)[I_y(y_o - h_y) - 2\beta_3] \quad \text{(D.8)}$$

$$L_d = 4{,}8(\beta_4\, b_w/t^3)^{0,25} \quad \text{(D.9)}$$

$$\eta = (\pi/L_d)^2 \quad \text{(D.10)}$$

$$k_\phi = \frac{Et^3}{5{,}46(b_w + 0{,}06L_d)}\left[1 - \frac{1{,}11\sigma_{dist}}{Et^2}\left(\frac{b_w^{\,2} L_d}{b_w^{\,2} + L_d^{\,2}}\right)^2\right] \quad \text{(D.11)}$$

σ_{dist} deve ser calculada, em primeira aproximação, pela expressão (D.1) com

$$\mathrm{I}\alpha_1 = (\eta/\beta_1)(\beta_2 + 0{,}039 I_t L_d^{\,2})$$

As propriedades geométricas A_d; I_x; I_y; I_{xy}; C_w; h_x; h_y; x_o e y_o devem ser calculadas para a seção transversal constituída apenas pela mesa e pelos enrijecedores (ver figura D.1).

D.3 Seções do tipo U enrijecido, submetidas à compressão uniforme

Para as seções transversais com relação b_f/b_w (figura D.2) compreendida entre 0,4 e 2,0, podem ser aplicadas as expressões estabelecidas em D.2, substituindo as expressões (D.6), (D.7) e (D.8) pelas expressões (D.12), (D.13) e (D.14), respectivamente.

$$\beta_2 = I_x b_f^{\,2} \quad \text{(D.12)}$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f \quad \text{(D.13)}$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^{\,2} \quad \text{(D.14)}$$

As propriedades geométricas A_d; I_x; I_y; I_{xy}; I_t; h_x e h_y devem ser calculadas para a seção transversal constituída apenas pela mesa e pelo enrijecedor de borda (figura D.2), cujas expressões são apresentadas a seguir:

$$A_d = (b_f + D)t \quad \text{(D.15)}$$

$$I_x = b_f t^3/12 + tD^3/12 + b_f t\, h_y^{\,2} + Dt(0{,}5\mathrm{D} + h_y)^2 \quad \text{(D.16)}$$

$$I_y = tb_f^{\,3}/12 + Dt^3/12 + Dt(b_f + h_x)^2 + b_f t(h_x + 0{,}5b_f)^2 \quad \text{(D.17)}$$

$$I_{xy} = b_f t\, h_y(0{,}5b_f + h_x) + Dt(0{,}5D + h_y)(b_f + h_x) \quad \text{(D.18)}$$

$$I_t = t^3(b_f + D)/3 \quad \text{(D.19)}$$

$$h_x = -\,0{,}5(b_f^{\,2} + 2b_f D)/(b_f + D) \quad \text{(D.20)}$$

$$h_y = -\,0{,}5D^2/(b_f + D) \quad \text{(D.21)}$$

Onde:

b_f; b_w; D; t são indicados na figura D.2.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Se a relação D/b_w for maior que os valores indicados na tabela D.1, a flambagem por distorção não corresponde ao modo crítico, portanto sua verificação pode ser dispensada.

D.4 Seções do tipo U enrijecido e do tipo Z enrijecido, submetidas à flexão em relação ao eixo perpendicular à alma

A tensão convencional de flambagem elástica por distorção σ_{dist} para seções do tipo U enrijecido e do tipo Z enrijecido submetidas à flexão em relação ao eixo perpendicular à alma pode ser determinada conforme D.2 e D.3, substituindo as expressões (D.9) e (D.11) por (D.22) e (D.23), respectivamente.

$$L_d = 4{,}8(0{,}5 I_x\, b_f^2\, b_w/t^3)^{0{,}25} \qquad \text{(D.22)}$$

$$k_\phi = \frac{Et^3}{2{,}73(b_w + 0{,}06L_d)}\left[1 - \frac{1{,}11\sigma_{dist}}{Et^2}\left(\frac{b_w^{\,4} L_d^{\,2}}{12{,}56L_d^{\,4} + 2{,}192b_w^{\,4} + 13{,}39L_d^{\,2} b_w^{\,2}}\right)\right] \qquad \text{(D.23)}$$

Onde:

σ_{dist} deve ser calculada, em primeira aproximação, pela expressão (D.1) com

$\alpha_1 = (\eta/\beta_1)(I_x\, b_f^2 + 0{,}039 I_t\, L_d^2)$

Se o valor de k_ϕ resultar negativo, k_ϕ deve ser novamente calculado com $\sigma_{dist} = 0$.

Se o comprimento livre à flambagem por distorção (distância entre seções com restrição total à distorção da mesa comprimida) for inferior a L_d, calculado conforme a expressão (D.22), L_d deve ser substituído pelo comprimento livre à flambagem por distorção.

Se a relação D/b_w for maior que os valores indicados na tabela D.2, a flambagem por distorção não corresponde ao modo crítico, portanto sua verificação pode ser dispensada.

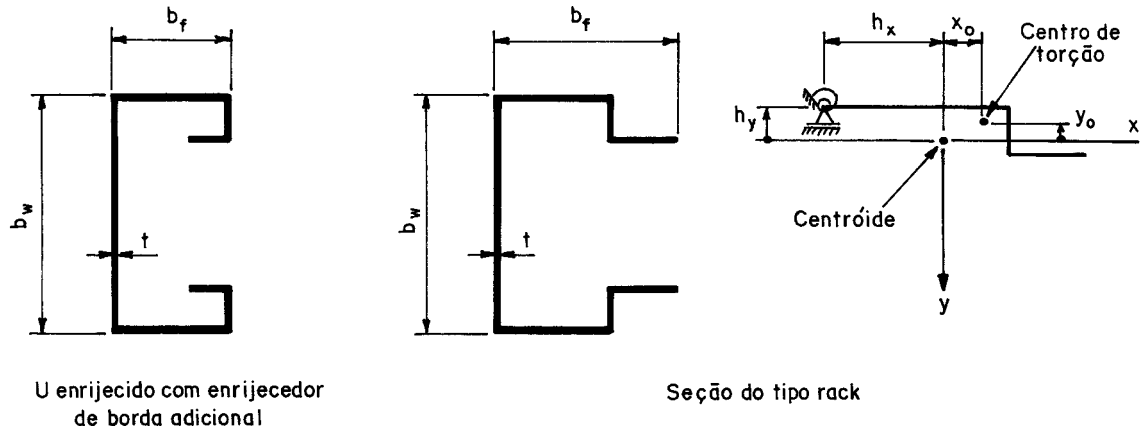


Figura D.1 - Seção do tipo U enrijecido com enrijecedores de borda adicionais e o caso particular de seção do tipo *rack*

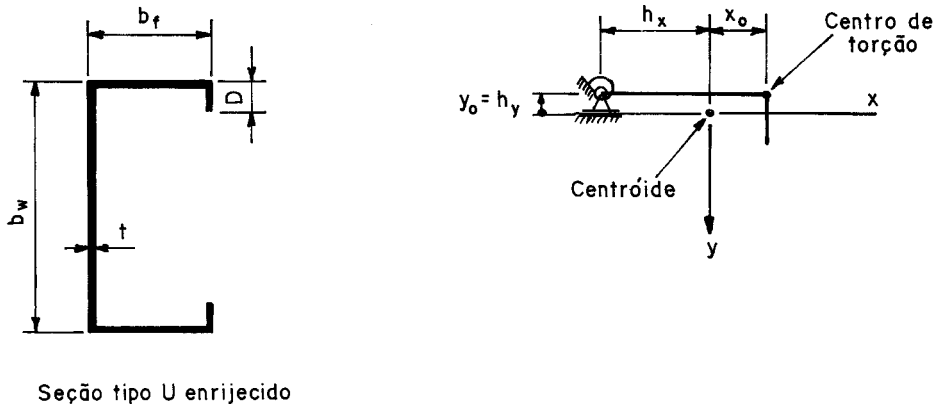


Figura D.2 - Seção do tipo U enrijecido

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Tabela D.1 -Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido, submetidas à compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem por distorção[1), 2)]

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

1) b_f; b_w; D; t são indicados na figura D.2.

2) Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Tabela D.2 - Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido, submetidas à flexão para dispensar a verificação da flambagem por distorção[1), 2)]

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19

1) b_f; b_w; D; t são indicados na figura D.2.

2) Para valores intermediários, interpolar linearmente.

D.5 Seções do tipo cartola e seções do tipo U enrijecido, submetidas à flexão em relação ao eixo paralelo à alma com enrijecedores de borda comprimidos

Para as seções do tipo cartola [figura D.3-a)] e seções do tipo U enrijecido, submetidas à flexão em relação ao eixo paralelo à alma [figura D.30-b)], com os enrijecedores de borda comprimidos, a tensão convencional de flambagem elástica por distorção σ_{dist} pode ser determinada com base no seguinte procedimento:

a) determinar a localização do eixo neutro da seção bruta, definindo d_c e d_t como as distâncias entre o eixo neutro e as fibras extremas comprimida e tracionada, respectivamente [figura D.3-a)];

b) definir uma "barra comprimida equivalente", com a seção transversal constituída pela parte do elemento sujeito à distorção, compreendida entre a fibra extrema comprimida e a ordenada y_{eq} [figura D.3-c)], dada por:

$$y_{eq} = d(3d_c - d_t)/(12d_c) \qquad \text{(D.24)}$$

Onde:

d é a altura da seção

c) determinar y_0, que é a distância entre o centróide da seção transversal da barra comprimida equivalente e o seu centro de torção, na direção do eixo y [figura D.3-c)].

d) determinar a constante de rigidez k_x, em quilonewtons por centímetro, referente à flexão do elemento sujeito à distorção, isolando um segmento da barra com comprimento igual a 1 cm [figura D.3-d)]:

$$k_x = F_x/d_x \qquad \text{(D.25)}$$

Onde:

F_x é a força transversal ao elemento, igual a 0,001 kN e aplicada na posição do centróide da seção da barra comprimida equivalente;

d_x é o deslocamento do centróide na direção de F_x, em centímetros, dado por:

$$d_x = h^2(0{,}195h + 0{,}292b_f)/(10^6t^3) \qquad \text{(D.26)}$$

Onde:

h é a distância entre a fibra extrema tracionada da seção e o centróide da seção da barra comprimida equivalente, em centímetros;

b_f é a largura nominal do elemento tracionado da seção, em centímetros;

t é a espessura da seção, em centímetros;

e) determinar o parâmetro μ_0 dado por:

$$\mu_0 = h/(h + 3{,}4y_0) \qquad \text{(D.27)}$$

f) se a distorção é contida em duas ou mais seções:

$$N_e = 9{,}83EI_{eq}/L^2 \qquad \text{(D.28)}$$

$$L_0 = 3{,}7[I_{eq}(h/t)^3]^{0{,}25} \qquad \text{(D.29)}$$

Onde:

I_{eq} é o momento de inércia da seção transversal da barra comprimida equivalente em relação ao eixo y [ver figura D.3-c)];

L é o comprimento sem contenção transversal do elemento sujeito à distorção:

- para $(k_xL^2/N_e) \leq 30$:

$$N_{cr} = \mu N_e[1 + k_xL^2/(\pi^2N_e)] \qquad \text{(D.30)}$$

- para $(k_xL^2/N_e) > 30$:

$$N_{cr} = \mu N_e[0{,}6 + 0{,}635(k_xL^2/N_e)^{0{,}5}] \qquad \text{(D.31)}$$

Em ambos os casos, $\mu = \mu_0$ se $L \geq L_0$ e $\mu = L\mu_0/L_0$, se $L < L_0$.

g) se a distorção é contida em menos de duas seções:

$$N_{cr} = \mu_0(4k_xEI_{eq})^{0{,}5} \qquad \text{(D.32)}$$

h) determinar o índice de esbeltez da barra comprimida equivalente, dado por:

$$\lambda_{eq} = 0{,}0198E/(N_{cr}/A_{eq})^{0{,}5} \qquad \text{(D.33)}$$

Onde:

A_{eq} é a área da seção transversal da barra comprimida equivalente.

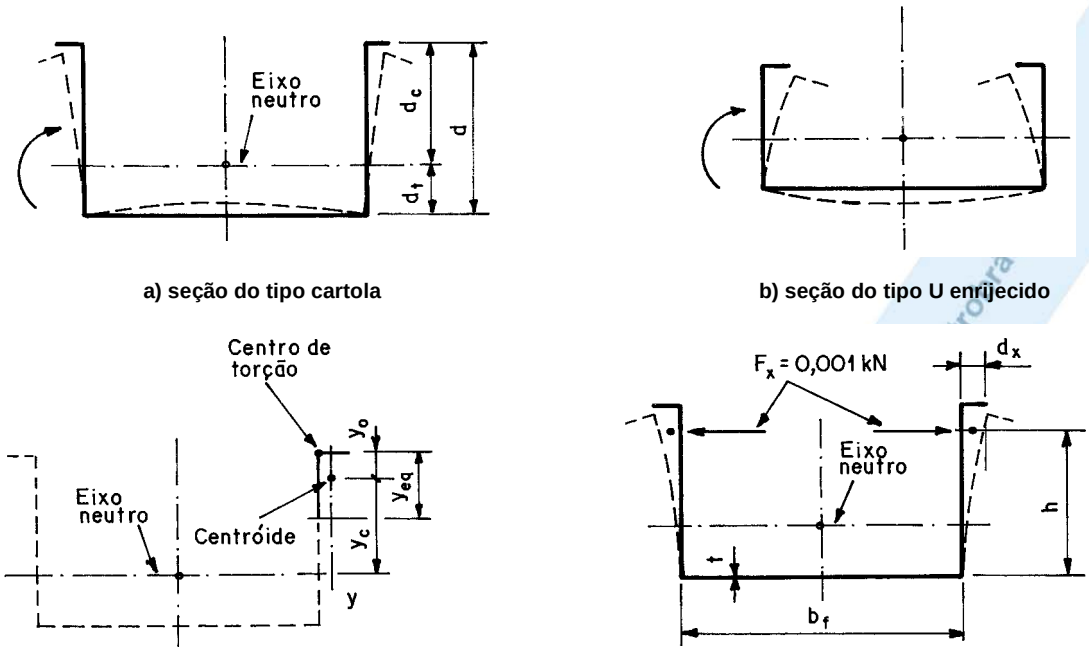
i) determinar a tensão convencional de flambagem elástica por distorção, dada por:

$$\sigma_{dist} = (\pi^2E/\lambda_{eq}^2)(d_c/y_c) \qquad \text{(D.34)}$$

Onde:

y_c é a distância entre o eixo neutro da seção bruta e o centróide da barra comprimida equivalente [figura D.3-c)].

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.



a) seção do tipo cartola

b) seção do tipo U enrijecido

c) barra comprimida equivalente

d) cálculo da rigidez à flexão: segmento da barra com comprimento igual a 1 cm

Figura D.3 - Seções submetidas à flexão com enrijecedores de borda comprimidos

/ANEXO E

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Anexo E (normativo)
Barras sujeitas a forças concentradas sem enrijecedores transversais

E.1 Generalidades

Este anexo é aplicável às barras sujeitas a forças concentradas atuando perpendicularmente ao eixo longitudinal da barra, em seções sem enrijecedores transversais, causando compressão na alma (figura E.1).

E.2 Requisitos

A força resistente de cálculo F_{Rd} deve ser calculada, conforme o caso, pelas expressões numeradas indicadas na tabela E.1.

Tabela E.1 - Numeração das expressões para cálculo da força resistente de cálculo F_{Rd}

Força		Perfis com almas simples[1)]		Perfis I ou similares[2)]
		Mesas AA	Mesas AL	Mesas AA ou AL
Forças aplicadas em mesas opostas com espaçamento ≥ 1,5 h	Força na extremidade da viga	Expressão (E.1)	Expressão (E.2)	Expressão (E.3)
	Força interna	Expressão (E.4)	Expressão (E.4)	Expressão (E.5)
Forças aplicadas em mesas opostas com espaçamento < 1,5 h	Força na extremidade da viga	Expressão (E.6)	Expressão (E.6)	Expressão (E.7)
	Força interna	Expressão (E.8)	Expressão (E.8)	Expressão (E.9)

[1)] Perfis com almas não associadas, como, por exemplo, perfis U, Z, cartola, caixão, etc.

[2)] Perfis I constituídos por dois perfis U conectados, ou perfis similares com elevada restrição à rotação da alma, como, por exemplo, perfil I constituído pela soldagem de duas cantoneiras a um perfil U.

As expressões numeradas indicadas na tabela E.1 estão relacionadas a seguir:

a) Expressão (E.1): $F_{Rd} = (894 f_y/E) t^2 C_3 C_4 C_9 C_\theta [331 - 0{,}61(h/t)][1 + 0{,}01(c/t)]/\gamma$ para $f_y < 460$ MPa

$F_{Rd} = 1{,}34 t^2 C_4 C_9 C_\theta [331 - 0{,}61(h/t)][1 + 0{,}01(c/t)]/\gamma$ para $f_y \geq 460$ MPa

b) Expressão (E.2): $F_{Rd} = (894 f_y/E) t^2 C_3 C_4 C_9 C_\theta [217 - 0{,}28(h/t)][1+0{,}01(c/t)]/\gamma$ para $f_y < 460$ MPa

$F_{Rd} = 1{,}34 t^2 C_4 C_9 C_\theta [217 - 0{,}28(h/t)][1 + 0{,}01(c/t)]/\gamma$ para $f_y \geq 460$ MPa

Quando $c/t > 60$, o fator $[1 + 0{,}01(c/t)]$ pode ser substituído por $[0{,}71 + 0{,}015(c/t)]$

c) Expressão (E.3): $F_{Rd} = t^2 f_y C_6 [10 + 1{,}25(c/t)^{0{,}5}]/\gamma$

d) Expressão (E.4): $F_{Rd} = (894 f_y/E) t^2 C_1 C_2 C_9 C_\theta [538 - 0{,}74(h/t)][1 + 0{,}007(c/t)]/\gamma$

Quando $c/t > 60$, o fator $[1 + 0{,}007(c/t)]$ pode ser substituído por $[0{,}75 + 0{,}011(c/t)]$

e) Expressão (E.5): $F_{Rd} = t^2 f_y C_5 [0{,}88 + 0{,}063t][15 + 3{,}25(c/t)^{0{,}5}]/\gamma$

f) Expressão (E.6): $F_{Rd} = (894 f_y/E) t^2 C_3 C_4 C_9 C_\theta [244 - 0{,}57(h/t)][1 + 0{,}01(c/t)]/\gamma$ para $f_y < 460$ MPa

$F_{Rd} = 1{,}34 t^2 C_4 C_9 C_\theta [244 - 0{,}57(h/t)][1 + 0{,}01(c/t)]/\gamma$ para $f_y \geq 460$ MPa

g) Expressão (E.7): $F_{Rd} = t^2 f_y C_8 [0{,}64 + 0{,}162t][10 + 1{,}25(c/t)^{0{,}5}]/\gamma$

h) Expressão (E.8): $F_{Rd} = (894 f_y/E) t^2 C_1 C_2 C_9 C_\theta [771 - 2{,}26(h/t)][1 + 0{,}0013(c/t)]/\gamma$

i) Expressão (E.9): $F_{Rd} = t^2 f_y C_7 [0{,}82 + 0{,}079t][15 + 3{,}25(c/t)^{0{,}5}]/\gamma$

Onde:

F_{Rd} é a força resistente de cálculo, em newtons;

$\gamma = 1{,}35$;

E é o módulo de elasticidade do aço, em megapascals;

f_y é a resistência ao escoamento do aço, em megapascals;

c é o comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicada, em milímetros (ver figura E.1). Para o caso de forças iguais aplicadas em ambas as mesas, com comprimentos de atuação diferentes, adotar o menor valor de c;

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

h é a largura da alma (parte plana da alma), em milímetros;

t é a espessura da alma, em milímetros;

$C_1 = 1{,}22 - 197 f_y/E$

$C_2 = 1{,}06 - 0{,}06 r_i/t \leq 1{,}0$

$C_3 = 1{,}33 - 295 f_y/E$

$C_4 = 1{,}15 - 0{,}15 r_i/t$ $(0{,}5 \leq C_4 \leq 1{,}0)$

$C_5 = 1{,}49 - 474 f_y/E \geq 0{,}6$

$C_6 = 1 + [(h/t)/750]$ para $h/t \leq 150$

$C_6 = 1{,}20$ para $h/t > 150$

$C_7 = E/(894 f_y)$ para $h/t \leq 66{,}5$

$C_7 = [1{,}1 - (h/t)/665][E/(894 f_y)]$ para $h/t > 66{,}5$

$C_8 = [0{,}98 - (h/t)/865][E/(894 f_y)]$

$C_9 = 6{,}9$

$C_\theta = 0{,}7 + 0{,}3(\theta/90)^2$

r_i é o raio interno de dobramento, em milímetros;

θ é o ângulo entre o plano da alma e o plano da superfície de apoio, em graus ($45° \leq \theta \leq 90°$).

A figura E.1 ilustra os casos de aplicação das expressões (E.1) a (E.9).

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.

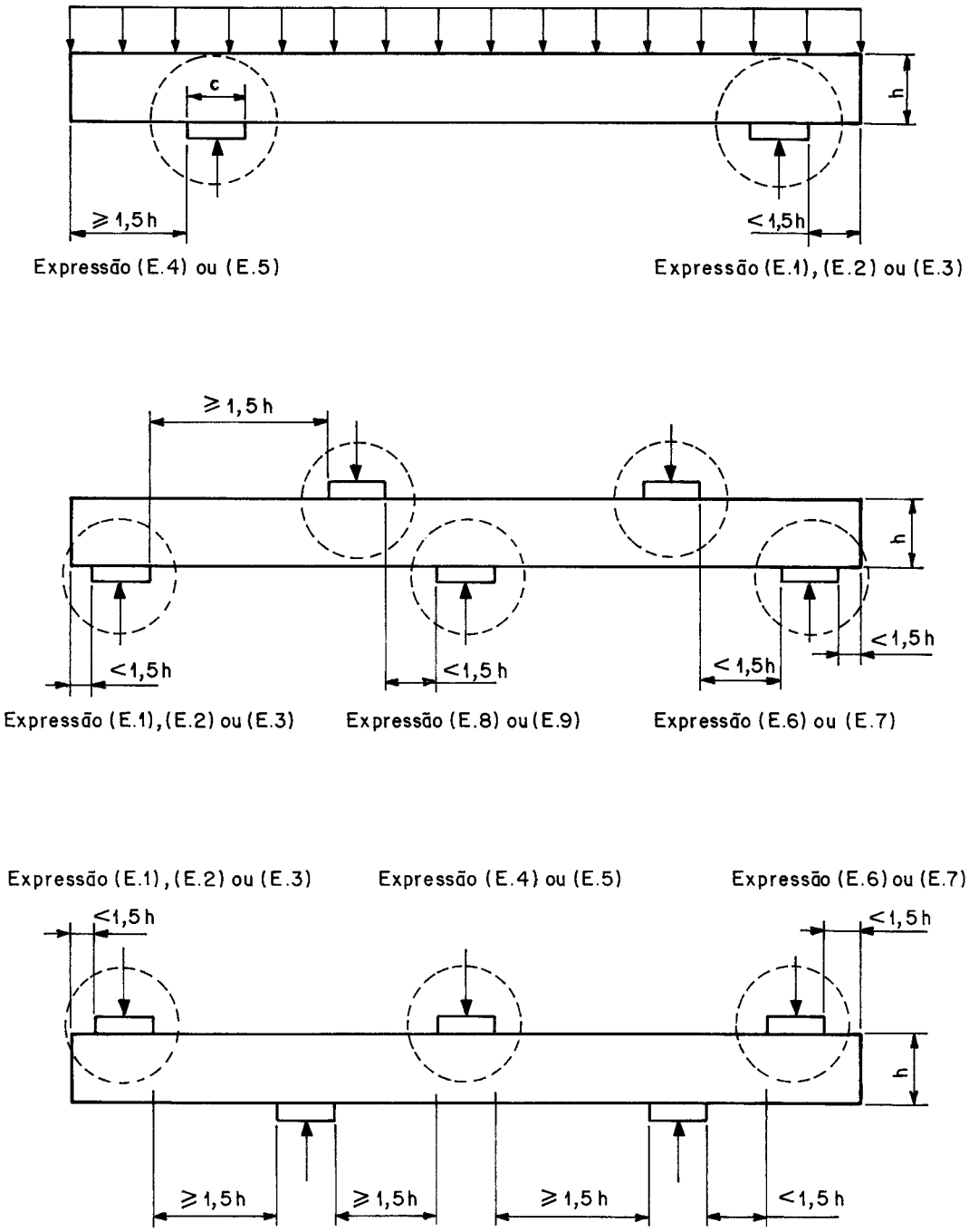


Figura E.1 - Ilustração dos casos de aplicação das expressões (E.1) a (E.9)

Nova para Petrobrás S.A.

/ANEXO F

Anexo F (informativo)
Barras com painel conectado à mesa tracionada

F.1 O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} de barras submetidas à flexão, com carregamento num plano paralelo à alma, com a mesa tracionada conectada a um painel (terças com telhas de aço parafusadas e sujeitas à ação de vento de sucção, por exemplo) e a mesa comprimida sem travamento lateral, pode ser calculado por:

$M_{Rd} = 0{,}4W_{ef}f_{yl}/\gamma$ para barras biapoiadas em perfil U enrijecido

$M_{Rd} = 0{,}5W_{ef}f_{yl}/\gamma$ para barras biapoiadas em perfil Z enrijecido

$M_{Rd} = 0{,}6W_{ef}f_{yl}/\gamma$ para barras contínuas em perfil U enrijecido

$M_{Rd} = 0{,}7W_{ef}f_{yl}/\gamma$ para barras contínuas em perfil Z enrijecido

Onde:

$\gamma = 1{,}1$;

f_y; W_{ef} definidos em 7.8.1.1.

O emprego das expressões anteriores é permitido, desde que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- altura do perfil inferior a 300 mm;
- relação altura-espessura do perfil compreendida entre 60 e 170;
- relação altura-largura da mesa do perfil compreendida entre 2,8 e 4,5;
- relação largura plana da mesa/espessura do perfil compreendida entre 16 e 43;
- para vigas contínuas, cuja continuidade é obtida por sobreposição das barras nos apoios, o traspasse de cada lado do centro dos apoios internos deve ser maior ou igual a 1,5 d, sendo d a altura da viga;
- vão inferior a 10 m;
- para vigas contínuas, a relação entre o maior e o menor vão não deve ultrapassar 1,2;
- deslocamento lateral de ambas as mesas impedido nos apoios;
- painel constituído por chapa de aço, espessura mínima de 0,45 mm, altura mínima de 25 mm, espaçamento máximo entre centro de nervuras igual a 300 mm e conectado adequadamente à viga, de maneira a evitar o movimento relativo entre o painel e a mesa da viga;
- tipos de conectores: no mínimo parafusos autoperfurantes ou auto-atarraxantes nº 12, ou rebites com diâmetro nominal 5 mm, e arruelas com diâmetro nominal 12,5 mm;
- conectores não padronizados não devem ser utilizados;
- espaçamento máximo entre centro de conectores não maior que 300 mm, e posicionados próximos ao centro da mesa da viga.

F.2 Se uma ou mais condições estabelecidas anteriormente não forem satisfeitas, o dimensionamento pode ser feito com base em ensaios, conforme a seção 9, ou com base em modelos semi-empíricos.

Em qualquer caso é permitido o dimensionamento com base em ensaios, conforme a seção 9, ou com base em modelos semi-empíricos, como alternativa ao procedimento proposto neste anexo.

F.3 Este anexo não é aplicável às vigas com seção do tipo U sem enrijecedores de borda, aos trechos em balanço, nem às regiões entre um ponto de inflexão e o apoio adjacente em vigas contínuas. Para esses casos, o momento fletor resistente de cálculo deve ser obtido desprezando-se a contribuição do painel conectado à mesa tracionada, conforme 7.8.1.2, ou com base em ensaios, conforme a seção 9.

Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.
Licença de uso exclusiva para Petrobrás S.A.