

NORMA
BRASILEIRA

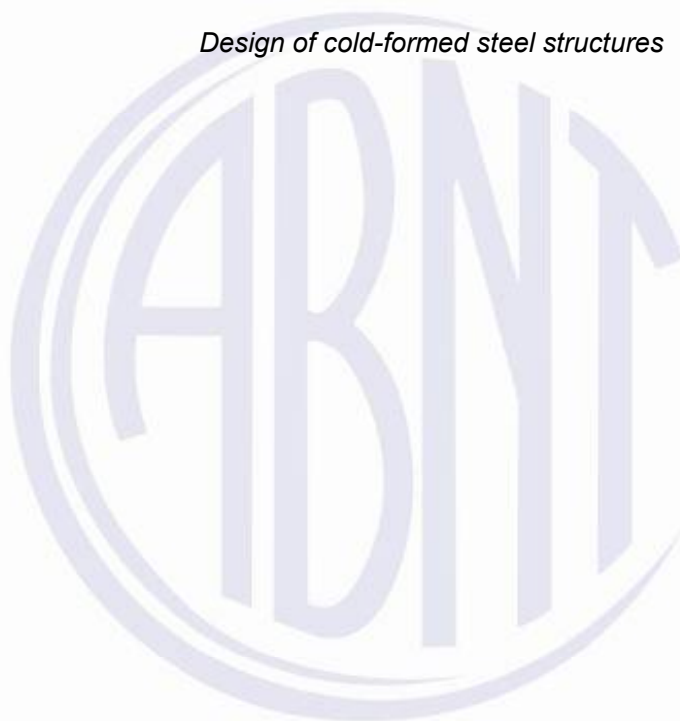
ABNT NBR
14762

Segunda edição
09.07.2010

Válida a partir de
09.08.2010

Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

Design of cold-formed steel structures



ICS 77.140.01

ISBN 978-85-07-02181-0



ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA
DE NORMAS
TÉCNICAS

Número de referência
ABNT NBR 14762:2010
87 páginas

© ABNT 2010



© ABNT 2010

Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou utilizada por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito da ABNT.

ABNT

Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar

20031-901 - Rio de Janeiro - RJ

Tel.: + 55 21 3974-2300

Fax: + 55 21 2220-1762

abnt@abnt.org.br

www.abnt.org.br

Impresso no Brasil

Sumário

Página

Prefácio.....	vi
1 Escopo.....	1
2 Referências normativas	1
3 Termos e definições, simbologia e unidades.....	3
3.1 Termos e definições	3
3.2 Simbologia	5
3.2.1 Letras romanas maiúsculas	5
3.3 Unidades.....	12
4 Materiais	12
4.1 Aços para perfis.....	12
4.2 Aços sem qualificação estrutural para perfis.....	13
4.3 Parafusos	13
4.4 Parafusos de aço sem qualificação estrutural	13
4.5 Eletrodos, arames e fluxos para soldagem	13
4.6 Propriedades mecânicas gerais.....	13
4.7 Durabilidade	13
5 Segurança e estados-limites	14
5.1 Critérios de segurança.....	14
5.2 Estados-limites	14
5.3 Condições usuais relativas aos estados-limites últimos (ELU)	14
5.4 Condições usuais relativas aos estados-limites de serviços (ELS)	14
6 Ações	15
6.1 Ações a considerar e classificação	15
6.2 Ações permanentes.....	15
6.2.1 Generalidades	15
6.2.2 Ações permanentes diretas.....	15
6.2.3 Ações permanentes indiretas	15
6.3 Ações variáveis.....	15
6.4 Ações excepcionais	16
6.5 Valores das ações	16
6.5.1 Valores característicos	16
6.5.2 Valores característicos nominais	17
6.5.3 Valores representativos	17
6.5.4 Valores de cálculo	17
6.6 Coeficientes de ponderação das ações	17
6.6.1 Coeficientes de ponderação das ações no estado-limite último (ELU)	18
6.6.2 Coeficientes de ponderação e fatores de redução das ações no estado-limite de serviço (ELS).....	18
6.7 Combinações de ações.....	20
6.7.1 Generalidades	20
6.7.2 Combinações últimas.....	20
6.7.3 Combinações de serviço	22
7 Resistências.....	23
7.1 Valores das resistências.....	23
7.1.1 Valores característicos e nominais	23
7.1.2 Valores de cálculo	23
7.2 Coeficientes de ponderação das resistências no estado-limite último (ELU)	23
7.3 Coeficientes de ponderação das resistências no estado-limite de serviço (ELS)	23
8 Análise estrutural, estabilidade e dimensionamento	24
8.1 Análise estrutural	24

8.2	Estabilidade dos componentes da estrutura.....	24
8.3	Resistência ao escoamento e aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio	24
8.4	Métodos para dimensionamento de barra	24
9	Condições específicas para o dimensionamento de barras.....	25
9.1	Condições gerais	25
9.1.1	Aplicabilidade	25
9.1.2	Valores máximos da relação largura-espessura	25
9.2	Flambagem local.....	26
9.2.1	Generalidades	26
9.2.2	Largura efetiva de elementos AA e AL.....	26
9.2.3	Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples	30
9.3	Flambagem distorcional	31
9.4	Efeito <i>shear lag</i>	32
9.5	Enrijecedores transversais.....	33
9.5.1	Enrijecedores transversais em seções com força concentrada	33
9.6	Barras submetidas à força axial de tração	34
9.7	Barras submetidas à força axial de compressão.....	38
9.7.1	Generalidades	38
9.7.2	Flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção	38
9.7.3	Flambagem distorcional	43
9.7.4	Limitação de esbeltez.....	44
9.7.5	Barras compostas comprimidas.....	44
9.8	Barras submetidas à flexão simples	44
9.8.1	Generalidades	44
9.8.2	Momento fletor	44
9.8.3	Força cortante	50
9.8.4	Momento fletor e força cortante combinados	51
9.8.5	Cálculo de deslocamentos	51
9.8.6	Barras compostas submetidas à flexão	52
9.8.7	Vigas mistas de aço e concreto	53
10	Condições específicas para o dimensionamento de ligações	54
10.1	Condições gerais.....	54
10.2	Ligações soldadas.....	54
10.2.1	Generalidades	54
10.2.2	Soldas de penetração em juntas de topo.....	54
10.2.3	Soldas de filete em superfícies planas.....	55
10.2.4	Soldas de filete em superfícies curvas	56
10.3	Ligações parafusadas	57
10.3.1	Generalidades	57
10.3.2	Dimensões dos furos	58
10.3.3	Disposições construtivas	58
10.3.4	Rasgamento entre furos ou entre furo e borda.....	58
10.3.5	Pressão de contato (esmagamento).....	58
10.3.6	Força de tração resistente de cálculo do parafuso	59
10.3.7	Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso	59
10.3.8	Tração e cisalhamento combinados.....	59
10.4	Colapso por rasgamento	60
10.5	Ligações com parafusos auto-atarraxantes	61
10.5.1	Disposições construtivas	62
10.5.2	Força de cisalhamento resistente de cálculo.....	62
10.5.3	Força de tração resistente de cálculo	63
10.5.4	Força de cisalhamento e rasgamento do metal base (<i>pull-over</i>) combinados	64
10.6	Pressão de contato sobre apoios de concreto	65
11	Dimensionamento com base em ensaios	65
11.1	Aplicação.....	65
11.2	Condições para execução de ensaios.....	65
11.3	Resposta estrutural	66
11.4	Emissão de relatório	66

11.5	Análise dos resultados	66
Anexo A	(normativo) Deslocamentos máximos.....	69
A.1	Generalidades	69
A.2	Considerações de projeto.....	69
A.3	Valores máximos	69
Anexo B	(normativo) Aumento da resistência ao escoamento devido ao efeito do trabalho a frio.....	72
B.1	Generalidades	72
B.2	Requisitos	72
B.2.1	Barras submetidas à compressão e barras submetidas à flexão	72
B.2.2	Barras submetidas à tração	73
B.3	Ensaaios	73
Anexo C	(normativo) Método da resistência direta	74
C.1	Generalidades	74
C.2	Flambagem elástica local, distorcional e global	75
C.3	Barras submetidas à compressão centrada.....	75
C.3.1	Flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção	75
C.3.2	Flambagem local.....	75
C.3.3	Flambagem distorcional	76
C.4	Barras submetidas à flexão simples	76
C.4.1	Flambagem lateral com torção.....	76
C.4.2	Flambagem local.....	76
C.4.3	Flambagem distorcional	77
C.5	Cálculo de deslocamentos	77
Anexo D	(normativo) Barras sem enrijecedores transversais sujeitas a forças concentradas	78
Anexo E	(normativo) Momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria	82
Anexo F	(normativo) Barras com painel conectado à mesa tracionada	85
Anexo G	(normativo) Vigas mistas de aço e concreto.....	87

Prefácio

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

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras das Diretivas ABNT, Parte 2.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) chama atenção para a possibilidade de que alguns dos elementos deste documento podem ser objeto de direito de patente. A ABNT não deve ser considerada responsável pela identificação de quaisquer direitos de patentes.

A ABNT NBR 14762 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Construção Civil (ABNT/CB-02), pela Comissão de Estudo de Estruturas Metálicas (CE-02:125.01). O Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 11, de 05.11.2009 a 04.01.2010, com o número de Projeto ABNT NBR 14762.

Esta segunda edição cancela e substitui a edição anterior (ABNT NBR 14762:2001), a qual foi tecnicamente revisada.

O Escopo desta Norma Brasileira em inglês é o seguinte:

Scope

This Standard, based on limit states method, establishes the basic requirements for the design, to the ambient temperature, of cold-formed structural members, constituted by carbon or low-alloy steel sheet, strip or plate, connected by fasteners or welds and applicable to buildings.

This Standard also applies to the design of other structures, besides buildings, since their particularities are considered, as for instance, the dynamic effects.

The author of the project should identify all limit states applicable, even if some are not covered in this standard, and to project the structure so that those limit states are not violated.

For situations or constructive solutions not covered in this standard, the author of the project should use a procedure accompanied by studies to maintain safety's level foreseen by this standard. For situations or constructive solutions covered by simplified way, the author of the project can use a more accurate procedure with the mentioned requirements.

Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio

1 Escopo

Esta Norma, com base no método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no dimensionamento, à temperatura ambiente, de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, 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 autor do projeto deve identificar todos os estados-limites aplicáveis, mesmo que alguns não sejam citados nesta Norma, projetando a estrutura de modo que esses estados-limites não sejam violados.

Para situações ou soluções construtivas não cobertas por esta Norma, o autor do projeto deve usar um procedimento acompanhado de estudos para manter o nível de segurança previsto por esta. Para situações ou soluções construtivas cobertas de maneira simplificada, o autor do projeto pode usar um procedimento mais preciso com os requisitos mencionados.

2 Referências normativas

Os documentos apresentados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 5004:1981, *Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica*

ABNT NBR 5920:2009, *Bobinas e chapas finas laminadas a frio de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural – Requisitos*

ABNT NBR 5921:2009, *Bobinas e chapas finas laminadas a quente de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural – Requisitos*

ABNT NBR 6118:2007, *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*

ABNT NBR 6120:2000, *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*

ABNT NBR 6123:1988, *Forças devidas ao vento em edificações*

ABNT NBR 6355:2003, *Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização*

ABNT NBR 6649:1986, *Chapas finas a frio de aço-carbono para uso estrutural*

ABNT NBR 6650:1986, *Chapas finas a quente de aço-carbono para uso estrutural*

ABNT NBR 7008:2003, *Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente – Especificação*

ABNT NBR 14762:2010

ABNT NBR 7013:2003, *Chapas e bobinas de aço revestidas pelo processo contínuo de imersão a quente – Requisitos gerais*

ABNT NBR 7188:1984, *Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*

ABNT NBR 8681:2003, *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*

ABNT NBR 8800:2008, *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*

ABNT NBR 14964:2003, *Chapas e bobinas de aço zincadas pelo processo contínuo de eletrodeposição – Requisitos gerais*

ABNT NBR 15421:2006, *Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento*

ISO 898-1:2009, *Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread*

ISO 4016:1999, *Hexagon head bolts – Product grade C*

AISI S902-02, *Stub-column test method for effective area of cold-formed steel columns*

ANSI/RMI MH16.1:2008, *Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks*

ASTM A307-07b, *Standard specification for carbon steel bolts and studs, 60 000 PSI tensile strength*

ASTM A325-09, *Standard specification for structural bolts, steel, heat treated, 120/105 ksi minimum tensile strength*

ASTM A325M-09, *Standard specification for structural bolts, steel, heat treated 830 MPa minimum tensile strength (Metric)*

ASTM A354-07a, *Standard specification for quenched and tempered alloy steel bolts, studs, and other externally threaded fasteners*

ASTM A370-09a, *Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*

ASTM A394-08, *Standard specification for steel transmission tower bolts, zinc-coated and bare*

ASTM A449-07b, *Standard specification for hex cap screws, bolts and studs, steel, heat treated, 120/105/90 ksi minimum tensile strength, general use*

ASTM A490-08b, *Standard specification for structural bolts, alloy steel, heat treated, 150 ksi minimum tensile strength*

ASTM A490M-09, *Standard specification for high-strength steel bolts, classes 10.9 and 10.9.3, for structural steel joints (Metric)*

AWS A5.1/A5.1M:2004, *Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding*

AWS A5.5/A5.5M:2006, *Specification for low-alloy steel electrodes for shielded metal arc welding*

AWS A5.17/A5.17M – 97:R2007, *Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding*

AWS A5.18/A5.18M:2005, *Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*

AWS A5.20/A5.20M:2005, *Carbon steel electrodes for flux cored arc welding*

AWS A5.23/A5.23M:2007, *Specification for low-alloy steel electrodes and fluxes for submerged arc welding*

AWS A5.28/A5.28M:2005, *Specification for low-alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*

AWS A5.29/A5.29M:2005, *Low-alloy steel electrodes for flux cored arc welding*

AWS D1.1/D1.1M:2008, *Structural welding code – steel*

AWS D1.3/D1.3M:2008, *Structural welding code – sheet steel*

EN 1992-1-1:2005, *Design of concrete structures – Part 1-1: General – Common rules for buildings and civil engineering structures*

EN 1993-1-1:2005, *Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*

EN 1994-1-1:2007, *Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*

3 Termos e definições, simbologia e unidades

3.1 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e 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 ABNT 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 tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, 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)

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

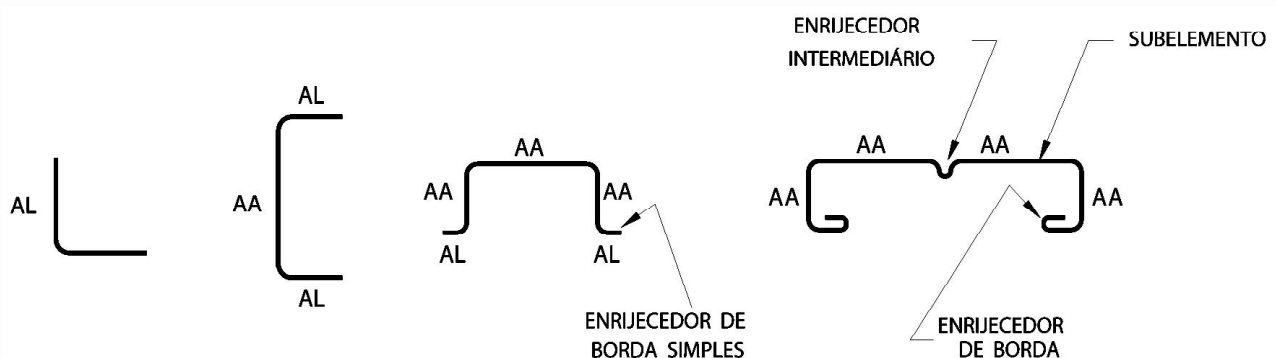


Figura 1 — Ilustração dos tipos de elementos componentes de perfis formados a frio

3.2 Simbologia

No que se refere aos perfis estruturais de aço formados a frio e suas ligações, 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
A_{ef}	– área efetiva da seção transversal da barra
A_{gv}	– área bruta sujeita a cisalhamento na verificação do colapso por rasgamento
A_n	– área líquida da seção transversal da barra na região da ligação
A_{n0}	– área líquida da seção transversal da barra fora da região da ligação
A_{nt}	– área líquida sujeita à tração na verificação do colapso por rasgamento
A_{nv}	– área líquida sujeita a cisalhamento na verificação do colapso por rasgamento
A_b	– área bruta da seção transversal do parafuso
A_s	– área da seção transversal do enrijecedor de alma
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	– fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
C_m	– fator empregado no cálculo do momento fletor de flambagem global elástica conforme Anexo E
C_p	– fator de correção
C_s	– fator empregado no cálculo do momento fletor de flambagem global elástica conforme Anexo E
C_t	– coeficiente de redução usado no cálculo da área líquida efetiva
C_w	– constante de empenamento da seção transversal
D	– largura nominal do enrijecedor de borda
E	– módulo de elasticidade do aço, adotado igual a 200 000 MPa
F	– força, valor de ação, em geral
$F_{G,k}$	– valor característico da ação permanente
$F_{Q,k}$	– valor característico da ação variável
$F_{Q,exc}$	– valor da ação transitória excepcional
F_{Rd}	– força resistente de cálculo, em geral

- F_{Sd} – força solicitante de cálculo, em geral
- G – módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77 000 MPa
- H – altura total do pilar (distância do topo à base)
- I_a – momento de inércia de referência do enrijecedor de borda
- I_s – momento de inércia da seção bruta do enrijecedor de borda, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido. A parte curva entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada
- $I_x ; I_y$ – momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y , respectivamente
- J – constante de torção
- $K_x L_x$ – comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x
- $K_y L_y$ – comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y
- $K_z L_z$ – comprimento efetivo de flambagem global por torção
- L – 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
- 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 distorcional elástica
- M_e – momento fletor de flambagem global elástica (FLT – flambagem lateral com torção)
- M_l – momento fletor de flambagem local elástica
- $M_{máx}$ – momento fletor solicitante máximo, em módulo, no segmento analisado para FLT
- M_n – momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço, conforme 6.7.3
- M_{Rd} – momento fletor resistente de cálculo
- M_{Re} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem global
- M_{Rk} – valor característico do momento fletor resistente
- M_{Rl} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem local

M_{Rdist}	– valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional
M_{Rser}	– momento fletor resistente, conforme Anexo C, calculado substituindo o produto Wf_y por M_n
$M_{x,Rd}$; $M_{y,Rd}$	– 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_1 ; M_2	– menor e maior momento fletor de extremidade da barra, respectivamente
$N_{c,Rd}$	– força axial de compressão resistente de cálculo
$N_{c,Re}$	– valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global
$N_{c,Rk}$	– valor característico da força axial de compressão resistente
$N_{c,Rl}$	– valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local
$N_{c,Rdist}$	– valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional
$N_{c,Sd}$	– força axial de compressão solicitante de cálculo
N_{dist}	– força axial de flambagem distorcional elástica
N_e	– força axial de flambagem global elástica
N_{ex} ; N_{ey}	– forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente
N_{ez}	– força axial de flambagem global elástica por torção
N_{exz}	– força axial de flambagem global elástica por flexo-torção
N_l	– força axial de flambagem local elástica
$N_{s,Rd}$	– força axial de compressão resistente de cálculo do enrijecedor de alma
$N_{t,Rd}$	– força axial de tração resistente de cálculo
$N_{t,Sd}$	– força axial de tração solicitante de cálculo
R_d	– valor de cálculo dos esforços resistentes, em geral
S_d	– valor de cálculo dos esforços solicitantes, em geral
S_{ser} , S_{lim}	– valor dos efeitos estruturais de interesse, obtidos com base nas combinações de serviço das ações, e valores-limites para esses efeitos, respectivamente
V_{Rd}	– força cortante resistente de cálculo
V_{Sd}	– força cortante solicitante de cálculo
W	– módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento

W_c	– módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida
$W_{c,ef}$	– módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida
W_{ef}	– módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento
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
a_m	– largura da alma referente à linha média da seção
b	– largura do elemento, é a dimensão plana do elemento sem incluir dobras
b_c	– largura do trecho comprimido de elementos sob gradiente de tensões normais, conforme indicada nas Tabelas 4 e 5
b_{ef}	– largura efetiva
$b_{ef,1}$; $b_{ef,2}$	– larguras efetivas indicadas na Tabela 4 e na Figura 2
b_f	– largura nominal da mesa
b_{f0}	– largura de referência empregada no cálculo do efeito <i>shear lag</i>
b_m	– largura da mesa referente à linha média da seção
b_s	– largura nominal do enrijecedor em perfil <i>rack</i>
b_w	– largura nominal da alma
c	– comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força concentrada
c_m	– largura do enrijecedor de borda referente à linha média da seção
d	– largura do enrijecedor de borda – diâmetro nominal do parafuso – altura da seção
d_{ef}	– largura efetiva do enrijecedor de borda
d_h	– diâmetro da cabeça ou do flange do parafuso auto-atarraxante
d_s	– largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda
d_w	– diâmetro da arruela do parafuso auto-atarraxante
d_{we}	– diâmetro efetivo associado ao rasgamento do metal base (<i>pull-over</i>)

e	<ul style="list-style-type: none"> – distância, na direção da força, do centro do furo-padrão à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade do elemento conectado – 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_{ub}	– resistência à ruptura do parafuso na tração
f_{u1}	– resistência à ruptura na tração do elemento conectado em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso auto-atarraxante
f_{u2}	– resistência à ruptura na tração do elemento conectado que não está em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso auto-atarraxante
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	<ul style="list-style-type: none"> – espaçamento dos parafusos na direção perpendicular à solicitação – distância entre os parafusos ou soldas na direção perpendicular ao eixo da barra
h	<ul style="list-style-type: none"> – 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)
j	– parâmetro empregado no cálculo do momento fletor de flambagem global elástica conforme Anexo E
k	– coeficiente de flambagem local do elemento
k_ℓ	– coeficiente de flambagem local para a seção completa
k_v	– coeficiente de flambagem local por cisalhamento
m	<ul style="list-style-type: none"> – 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	<ul style="list-style-type: none"> – expoente empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local k – 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_c	– profundidade de penetração do parafuso auto-atarraxante
t_{ef}	– dimensão efetiva (garganta efetiva) da solda de penetração ou de filete
t_s	– espessura do enrijecedor transversal
t_1	– espessura do elemento conectado em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso auto-atarraxante
t_2	– espessura do elemento conectado que não está em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso auto-atarraxante
$w_1 ; w_2$	– pernas do filete de solda em superfícies planas
x_m	– distância do centróide em relação à linha média da alma, na direção do eixo x
x_0	– distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo x
y_0	– distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo y

3.2.3 Letras gregas minúsculas

$\alpha ; \alpha_r ; \alpha_c ; \alpha_h$ – coeficientes empregados no cálculo da força resistente em barras sem enrijecedores transversais sujeitas a forças concentradas

α_e – coeficiente empregado no cálculo da força resistente ao esmagamento em ligações parafusadas

β – coeficiente de dilatação térmica, adotado igual a $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\beta_w ; \beta_t ; \beta_h$ – parâmetros empregados no cálculo do momento fletor de flambagem global elástica conforme Anexo E

β_0 – índice de confiabilidade-alvo

- δ – deslocamento, flecha, em geral
- δ_0 – contraflecha da viga
- δ_1 – deslocamento devido às ações permanentes, sem efeitos de longa duração
- δ_2 – deslocamento devido aos efeitos de longa duração das ações permanentes
- δ_3 – deslocamento devido às ações variáveis
- $\delta_{\text{máx}}$ – deslocamento máximo da viga
- δ_{tot} – soma de δ_1 , δ_2 e δ_3
- δ_f – coeficiente de variação do fator fabricação
- δ_m – coeficiente de variação do fator material
- δ_l – coeficiente de variação obtido em ensaios
- γ – coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral
- λ_{dist} – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional
- λ_l – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local
- λ_p – índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa
- 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 associado à flambagem global
- 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 – massa específica, adotada igual a 7 850 kg/m³
- χ – fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global
- χ_{dist} – fator de redução do esforço resistente, associado à flambagem distorcional
- χ_{FLT} – fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção
- σ – tensão normal, em geral
- σ_{cr} – tensão convencional de flambagem elástica de chapa
- σ_n – tensão normal de compressão calculada com base nas combinações de ações para os estados-limites de serviço
- Ψ – fator de redução das ações, fator de combinação de ações
– relação σ_2/σ_1 empregada no cálculo do coeficiente de flambagem local do elemento

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

4.1.1 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 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.

4.1.2 A Tabela 1 apresenta os valores nominais mínimos da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência à ruptura (f_u) de aços relacionados por Normas Brasileiras referentes a chapas finas para uso estrutural. Não são relacionados os aços com resistência ao escoamento inferior a 250 MPa, por não estarem sendo utilizados na prática. Informações completas sobre os aços relacionados na Tabela 1 encontram-se nas Normas correspondentes. Para aços destinados a chapas grossas, deve ser consultada a ABNT NBR 8800.

4.1.3 Aços não relacionados na Tabela 1 ou na ABNT NBR 8800 podem ser empregados, desde que atendam às exigências de 4.1.1. Nesse caso deve ser consultada a Norma correspondente.

Tabela 1 — Chapas finas de aço especificadas por Normas Brasileiras para uso estrutural ^a

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

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 (ver Tabela 16). Informações completas sobre os parafusos relacionados na Tabela 16 encontram-se nas Normas correspondentes.

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_{ub} .

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.

4.6 Propriedades mecânicas gerais

Para efeito de cálculo devem ser adotados, para os aços aqui previstos, os seguintes valores de propriedades mecânicas:

- a) módulo de elasticidade, $E = 200\ 000$ MPa;
- b) coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- c) módulo de elasticidade transversal, $G = 77\ 000$ MPa;
- d) coeficiente de dilatação térmica, $\beta = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- e) massa específica, $\rho = 7\ 850$ kg/m³.

4.7 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 projetada, 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 das ABNT NBR 6355 e ABNT NBR 8800);

- h) as medidas de proteção contra corrosão (no que couber, devem ser obedecidas as exigências da ABNT NBR 8800);
- i) as prováveis manutenções ao longo da vida útil projetada da edificação.

5 Segurança e estados-limites

5.1 Critérios de segurança

Os critérios de segurança adotados nesta Norma baseiam-se na ABNT NBR 8681.

5.2 Estados-limites

5.2.1 Para os efeitos desta Norma, devem ser considerados os estados-limites últimos (ELU) e os estados-limites de serviço (ELS). Os estados-limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil projetada, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional. Os estados-limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização.

5.2.2 O método dos estados-limites utilizado para o dimensionamento de uma estrutura exige que nenhum estado-limite aplicável seja excedido quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Se um ou mais estados-limites forem excedidos, a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada.

5.3 Condições usuais relativas aos estados-limites últimos (ELU)

5.3.1 As condições usuais de segurança referentes aos estados-limites últimos são expressas por desigualdades do tipo:

$$\theta (S_d, R_d) \geq 0$$

onde

S_d representa os valores de cálculo dos esforços atuantes (em alguns casos específicos, das tensões atuantes), obtidos com base nas combinações últimas de ações dadas em 6.7.2;

R_d representa os valores de cálculo dos correspondentes esforços resistentes (em alguns casos específicos, das tensões resistentes), obtidos em diversas partes desta Norma, conforme o tipo de situação.

5.3.2 Quando a segurança é verificada isoladamente em relação a cada um dos esforços atuantes, as condições de segurança tomam a seguinte forma simplificada:

$$R_d \geq S_d$$

5.4 Condições usuais relativas aos estados-limites de serviços (ELS)

As condições usuais referentes aos estados-limites de serviço são expressas por desigualdades do tipo:

$$S_{ser} \leq S_{lim}$$

onde

S_{ser} representa os valores dos efeitos estruturais de interesse, obtidos com base nas combinações de serviço das ações dadas em 6.7.3;

S_{lim} representa os valores-limites adotados para esses efeitos, fornecidos no Anexo A para o caso dos deslocamentos.

6 Ações

6.1 Ações a considerar e classificação

6.1.1 Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a estrutura, levando-se em conta os estados-limites últimos e de serviço.

6.1.2 As ações a considerar classificam-se, de acordo com a ABNT NBR 8681, em permanentes, variáveis e excepcionais.

6.2 Ações permanentes

6.2.1 Generalidades

Ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil projetada da construção. Também são consideradas permanentes as ações que crescem no tempo, tendendo a um valor-limite constante.

As ações permanentes são subdivididas em diretas e indiretas e devem ser consideradas com seus valores representativos mais desfavoráveis para a segurança.

6.2.2 Ações permanentes diretas

As ações permanentes diretas são constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelos pesos próprios dos elementos construtivos fixos e das instalações permanentes. Constituem também ação permanente os empuxos permanentes, causados por movimento de terra e de outros materiais granulosos quando forem admitidos não removíveis.

O peso específico do aço e de outros materiais estruturais e dos elementos construtivos fixos correntemente empregados nas construções, na ausência de informações mais precisas, podem ser avaliados com base nos valores indicados na ABNT NBR 6120.

Os pesos das instalações permanentes usualmente são considerados com os valores indicados pelos respectivos fornecedores.

6.2.3 Ações permanentes indiretas

As ações permanentes indiretas são constituídas pelas deformações impostas por retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoio e imperfeições geométricas.

A retração e a fluência do concreto de densidade normal devem ser calculadas conforme a ABNT NBR 6118. Para o concreto de baixa densidade, na ausência de Norma Brasileira aplicável, devem ser calculadas conforme EN 1992-1-1.

Os deslocamentos de apoio somente precisam ser considerados quando gerarem esforços significativos em relação ao conjunto das outras ações. Esses deslocamentos devem ser calculados com avaliação pessimista da rigidez do material da fundação, correspondente, em princípio, ao quantil de 5 % da respectiva distribuição de probabilidade. O conjunto formado pelos deslocamentos de todos os apoios constitui-se numa única ação.

As imperfeições geométricas podem ser levadas em conta conforme ABNT NBR 8800.

6.3 Ações variáveis

Ações variáveis são as que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil projetada da construção.

As ações variáveis comumente existentes são causadas pelo uso e ocupação da edificação, como as ações decorrentes de sobrecargas em pisos e coberturas, de equipamentos e de divisórias móveis, de pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas, pela ação do vento e pela variação da temperatura da estrutura.

As ações variáveis causadas pelo uso e ocupação são fornecidas pelas ABNT NBR 6120, ABNT NBR 8800 e, no caso de passarelas de pedestres, pela ABNT NBR 7188.

Os esforços causados pela ação do vento devem ser determinados de acordo com a ABNT NBR 6123.

Os esforços decorrentes da variação uniforme de temperatura da estrutura são causados pela variação da temperatura da atmosfera e pela insolação direta e devem ser determinados pelo responsável técnico pelo projeto estrutural considerando, entre outros parâmetros relevantes, o local da construção e as dimensões dos elementos estruturais. Recomenda-se, para a variação da temperatura da atmosfera, a adoção de um valor considerando 60 % da diferença entre as temperaturas médias máxima e mínima, no local da obra, com um mínimo de 10 °C. Para a insolação direta, deve ser feito um estudo específico. Nos elementos estruturais em que a temperatura possa ter distribuição significativamente diferente da uniforme, devem ser considerados os efeitos dessa distribuição. Na falta de dados mais precisos, pode ser admitida uma variação linear entre os valores de temperatura adotados, desde que a variação de temperatura considerada entre uma face e outra da estrutura não seja inferior a 5 °C.

Quando a estrutura, pelas suas condições de uso, estiver sujeita a choques ou vibrações, os respectivos efeitos devem ser considerados na determinação das solicitações e a possibilidade de fadiga deve ser considerada no dimensionamento dos elementos estruturais.

6.4 Ações excepcionais

Ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas. São ações excepcionais aquelas decorrentes de causas como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes e sismos excepcionais.

No projeto de estruturas sujeitas a situações excepcionais de carregamentos, cujos efeitos não possam ser controlados por outros meios, devem ser consideradas ações excepcionais com os valores definidos, em cada caso particular, por Normas Brasileiras específicas.

6.5 Valores das ações

6.5.1 Valores característicos

Os valores característicos, F_k , das ações são estabelecidos nesta subseção em função da variabilidade de suas intensidades.

6.5.1.1 Ações permanentes

Para as ações permanentes, os valores característicos, F_{gk} , devem ser adotados iguais aos valores médios das respectivas distribuições de probabilidade. Esses valores estão definidos nesta subseção ou em Normas Brasileiras específicas, como a ABNT NBR 6120.

6.5.1.2 Ações variáveis

Os valores característicos das ações variáveis, F_{qk} , são estabelecidos por consenso e indicados em Normas Brasileiras específicas. Esses valores têm uma probabilidade preestabelecida de serem ultrapassados no sentido desfavorável, durante um período projetado de 50 anos, e estão definidos nesta subseção ou em Normas Brasileiras específicas, como as ABNT NBR 6120, ABNT NBR 6123 e ABNT NBR 8800.

6.5.2 Valores característicos nominais

Para as ações que não tenham sua variabilidade adequadamente expressa por distribuições de probabilidade, os valores característicos são substituídos por valores característicos nominais, escolhidos de modo a assegurar o nível de exigência desta Norma.

6.5.3 Valores representativos

As ações são quantificadas por seus valores representativos, F_r , que podem ser:

- a) valores característicos ou valores característicos nominais, conforme 6.5.1 ou 6.5.2, respectivamente, e que são denominados simplesmente valores característicos nesta Norma;
- b) valores convencionais excepcionais, que são os valores arbitrados para as ações excepcionais;
- c) valores reduzidos, em função da combinação de ações, tais como:
 - nas verificações de estados-limites últimos, quando a ação considerada se combina com a ação principal (ver 6.7.2), determinados a partir dos valores característicos pela expressão $\psi_0 F_k$, que considera muito baixa a probabilidade de ocorrência simultânea dos valores característicos de duas ou mais ações variáveis de naturezas diferentes (entende-se por ações variáveis de naturezas diferentes aquelas originadas por agentes distintos; por exemplo, ação do vento, sobrecarga de cobertura, carga acidental de piso e carga de equipamento são de naturezas diferentes);
 - nas verificações de estados-limites de serviço (ver 6.7.3), determinados a partir dos valores característicos pelas expressões $\psi_1 F_k$ e $\psi_2 F_k$, que estimam valores freqüentes e quase permanentes, respectivamente, de uma ação que acompanha a ação principal (ver 6.6.2.2).

6.5.4 Valores de cálculo

Os valores de cálculo das ações são obtidos a partir dos valores representativos, F_r , multiplicando-os pelos respectivos coeficientes de ponderação γ_f definidos em 6.6.

6.6 Coeficientes de ponderação das ações

As ações devem ser ponderadas pelo coeficiente γ_f , dado por:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3}$$

onde

- γ_{f1} é a parcela do coeficiente de ponderação das ações γ_f , que considera a variabilidade das ações;
- γ_{f2} é a parcela do coeficiente de ponderação das ações γ_f , que considera a simultaneidade de atuação das ações;
- γ_{f3} é a parcela do coeficiente de ponderação das ações γ_f , que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, seja por problemas construtivos, seja por deficiência do método de cálculo empregado, de valor igual ou superior a 1,10.

Os valores de γ_f encontram-se estabelecidos em 6.6.1 e 6.6.2.

6.6.1 Coeficientes de ponderação das ações no estado-limite último (ELU)

Os valores-base para verificação dos estados-limites últimos são apresentados nas Tabelas 2 e 3, para o produto $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$ e para γ_{f2} , respectivamente. O produto $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$ é representado por γ_g ou γ_q . O coeficiente γ_{f2} é igual ao fator de combinação ψ_0 .

O valor do coeficiente de ponderação de cargas permanentes de mesma origem, num dado carregamento, deve ser o mesmo ao longo de toda a estrutura.

6.6.2 Coeficientes de ponderação e fatores de redução das ações no estado-limite de serviço (ELS)

6.6.2.1 Em geral, o coeficiente de ponderação das ações para os estados-limites de serviço, γ_f , é igual a 1,0.

6.6.2.2 Nas combinações de ações de serviço (ver 6.7.3) são usados os fatores de redução ψ_1 e ψ_2 , dados na Tabela 3, para obtenção dos valores frequentes e quase permanentes das ações variáveis, respectivamente.

Tabela 2 — Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1}\gamma_{f3}$

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b		Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
	1,20		1,40	1,20	1,50	

Tabela 2 (continuação)

	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}			
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00

^a 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.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a esse valor-limite.

Tabela 3 — Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis

Ações		γ_2 ^a		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2 ^d
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

^a Ver alínea c) de 6.5.3.

^b Edificações residenciais de acesso restrito.

^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

^d Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.

6.7 Combinações de ações

6.7.1 Generalidades

Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezáveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido.

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação dos estados-limites últimos e dos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente.

6.7.2 Combinações últimas

Uma combinação última de ações pode ser classificada em normal, especial, de construção e excepcional.

6.7.2.1 Combinações últimas normais

As combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação.

Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos aplicáveis. Em cada combinação devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

Para cada combinação, aplica-se a seguinte expressão:

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

onde

$F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

6.7.2.2 Combinações últimas especiais

As combinações últimas especiais decorrem da atuação de ações variáveis de natureza ou intensidade especial, cujos efeitos superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações consideradas nas combinações normais. Os carregamentos especiais são transitórios, com duração muito pequena em relação ao período de vida útil projetada da estrutura.

A cada carregamento especial corresponde uma única combinação última especial de ações, na qual devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável especial, com seus valores característicos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezável de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação.

Aplica-se a seguinte expressão:

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

onde

- $F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;
- $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável especial;
- $F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável especial;
- $\psi_{0j,ef}$ representa os fatores de combinação efetivos de cada uma das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável especial F_{Q1} .

Os fatores $\psi_{0j,ef}$ são iguais aos fatores ψ_{0j} adotados nas combinações normais, salvo quando a ação variável especial F_{Q1} tiver um tempo de atuação muito pequeno, caso em que $\psi_{0j,ef}$ podem ser tomados como os correspondentes fatores de redução ψ_{2j} .

6.7.2.3 Combinações últimas de construção

As combinações últimas de construção devem ser levadas em conta nas estruturas em que haja riscos de ocorrência de estados-limites últimos, já durante a fase de construção. O carregamento de construção é transitório e sua duração deve ser definida em cada caso particular.

Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas sejam necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos que são de se temer durante a fase de construção. Em cada combinação devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

Para cada combinação, aplica-se a mesma expressão dada em 6.7.2.2, onde $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável admitida como principal para a situação transitória considerada.

6.7.2.4 Combinações últimas excepcionais

As combinações últimas excepcionais decorrem da atuação de ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos. As ações excepcionais somente devem ser consideradas no projeto de estrutura de determinados tipos de construção, nos quais essas ações não possam ser desprezadas e que, além disso, na concepção estrutural, não possam ser tomadas medidas que anulem ou atenuem a gravidade das conseqüências dos seus efeitos. O carregamento excepcional é transitório, com duração extremamente curta.

A cada carregamento excepcional corresponde uma única combinação última excepcional de ações, na qual devem figurar as ações permanentes e a ação variável excepcional, com seus valores característicos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezável de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação, conforme a ABNT NBR 8681. Nos casos de ações sísmicas, deve ser utilizada a ABNT NBR 15421.

Aplica-se a seguinte expressão:

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

onde

$F_{Q,exc}$ é o valor da ação transitória excepcional.

6.7.3 Combinações de serviço

6.7.3.1 Generalidades

As combinações de serviço são classificadas de acordo com sua permanência na estrutura em quase permanentes, freqüentes e raras.

As expressões gerais apresentadas em 6.7.3.2 a 6.7.3.4 incluem as ações permanentes. Em algumas verificações apresentadas no Anexo A, essas ações podem ser desconsideradas.

6.7.3.2 Combinações quase permanentes de serviço

As combinações quase permanentes são aquelas que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade desse período. Essas combinações são utilizadas para os efeitos de longa duração e para a aparência da construção.

Nas combinações quase permanentes, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{Q,k}$:

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

No contexto dos estados-limites de serviço, o termo “aparência” deve ser entendido como relacionado a deslocamentos excessivos que não provoquem danos a outros componentes da construção, e não a questões meramente estéticas.

6.7.3.3 Combinações freqüentes de serviço

As combinações freqüentes são aquelas que se repetem muitas vezes durante o período de vida projetada da estrutura, da ordem da 10^5 vezes em 50 anos, ou que tenham duração total igual a uma parte não desprezável desse período, da ordem de 5 %. Essas combinações são utilizadas para os estados-limites reversíveis, isto é, que não causam danos permanentes à estrutura ou a outros componentes da construção, incluindo os relacionados ao conforto dos usuários e ao funcionamento de equipamentos, tais como vibrações excessivas, movimentos laterais excessivos que comprometam a vedação, empoçamentos em coberturas e aberturas de fissuras.

Nas combinações freqüentes, a ação variável principal F_{Q1} é tomada com seu valor freqüente $\psi_1 F_{Q1,k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{Q,k}$:

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

6.7.3.4 Combinações raras de serviço

As combinações raras são aquelas que podem atuar no máximo algumas horas durante o período projetado de vida da estrutura. Essas combinações são utilizadas para os estados-limites irreversíveis, isto é, que causam danos permanentes à estrutura ou a outros componentes da construção, e para aqueles relacionados ao funcionamento adequado da estrutura, tais como formação de fissuras e danos aos fechamentos.

Nas combinações raras, a ação variável principal F_{Q1} é tomada com seu valor característico $F_{Q1,k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores freqüentes $\psi_1 F_{Q,k}$:

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

7 Resistências

7.1 Valores das resistências

7.1.1 Valores característicos e nominais

7.1.1.1 As resistências dos materiais são representadas pelos valores característicos definidos como aqueles que, em um lote de material, têm apenas 5 % de probabilidade de não serem atingidos.

7.1.1.2 Nesta Norma, o valor característico pode ser substituído pelo valor nominal, quando fornecido por Norma ou especificação aplicável ao material. Por simplicidade, o termo “nominal” aplicado a uma resistência pode significar tanto uma resistência característica quanto uma resistência nominal.

7.1.2 Valores de cálculo

7.1.2.1 A resistência de cálculo f_d do aço é definida como:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

Nessa expressão, f_k é a resistência característica ou nominal e γ_m é o coeficiente de ponderação da resistência, dado por:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3}$$

onde

γ_{m1} é a parcela do coeficiente de ponderação que considera a variabilidade da resistência do aço;

γ_{m2} é a parcela do coeficiente de ponderação que considera a diferença entre a resistência do aço no corpo de prova e na estrutura;

γ_{m3} é a parcela do coeficiente de ponderação que considera os desvios gerados na construção e as aproximações feitas em projeto do ponto de vista das resistências.

7.1.2.2 Quando uma determinada resistência não depender de medidas feitas convencionalmente em ensaios de corpos de prova padronizados dos aços empregados, podem ser utilizadas tensões resistentes de cálculo para a determinação das solicitações resistentes de cálculo. Os valores das tensões resistentes de cálculo são estabelecidos, em cada caso particular, a partir das teorias de resistência dos elementos estruturais considerados.

7.2 Coeficientes de ponderação das resistências no estado-limite último (ELU)

Os valores do coeficiente de ponderação da resistência γ_m , aqui representado simplesmente por γ , são fornecidos em partes específicas desta Norma.

7.3 Coeficientes de ponderação das resistências no estado-limite de serviço (ELS)

Os limites estabelecidos para os estados-limites de serviço não necessitam de minoração, portanto, $\gamma_m = 1,00$.

8 Análise estrutural, estabilidade e dimensionamento

8.1 Análise estrutural

O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura, visando efetuar verificações de estados-limites últimos e de serviço.

A análise estrutural deve ser feita com base em um modelo realista, que permita representar a resposta da estrutura e dos materiais estruturais, levando-se em conta as deformações causadas por todos os esforços solicitantes relevantes. Onde necessário, a interação solo-estrutura e o comportamento das ligações devem ser contemplados no modelo.

Quanto aos materiais, esta Norma prevê a análise global elástica (diagrama tensão-deformação elástico-linear).

Deve ser empregado o procedimento de análise estrutural da ABNT NBR 8800, o qual estabelece critérios para avaliar a importância do efeito dos deslocamentos na resposta da estrutura, bem como estabelece limites para emprego da análise linear. Nesse procedimento, permite-se o uso do comprimento de flambagem igual ao comprimento destravado da barra ($K = 1,0$). O emprego de valores de K superiores a 1,0 é substituído por imperfeições geométricas e de material iniciais equivalentes.

8.2 Estabilidade dos componentes da estrutura

A estabilidade individual dos componentes da estrutura deve ser assegurada pelo atendimento das exigências da Seção 9 ou do Anexo C. As imperfeições associadas a esses componentes já estão incorporadas às expressões de dimensionamento. No projeto de barras isoladas, pode ser empregado o método do comprimento efetivo de flambagem, com os valores do coeficiente de flambagem K obtidos conforme ABNT NBR 8800.

Os esforços resistentes e a rigidez dos componentes previstos para conter lateralmente vigas e pilares em alguns pontos, definindo comprimentos destravados entre esses pontos, devem atender às exigências desta Norma e da ABNT NBR 8800, respectivamente.

8.3 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.

8.4 Métodos para dimensionamento de barra

8.4.1 Nesta Norma são previstos os seguintes métodos para o dimensionamento de barras:

- a) método da largura efetiva (MLE), em que a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal das barras, oriundas do cálculo das larguras efetivas dos elementos totalmente ou parcialmente comprimidos, conforme 9.2.2 e 9.2.3. Adicionalmente, deve ser considerada a flambagem distorcional, conforme 9.7.3 para barras submetidas à compressão e 9.8.2.3 para barras submetidas à flexão;
- b) método da seção efetiva (MSE), em que a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal das barras, calculadas diretamente conforme 9.7.2 b) para barras submetidas à compressão, 9.8.2.1 b) e 9.8.2.2 b) para barras submetidas à flexão. Adicionalmente, deve ser considerada a flambagem distorcional, conforme 9.7.3 para barras submetidas à compressão e 9.8.2.3 para barras submetidas à flexão;

- c) método da resistência direta (MRD), conforme Anexo C, com base nas propriedades geométricas da seção bruta e em análise geral de estabilidade elástica que permita identificar, para o caso em análise, todos os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos. Esse método pode ser empregado como alternativa às subseções 9.7 para cálculo de $N_{c,Rd}$, 9.8.2 para cálculo de M_{Rd} e 9.8.5 para cálculo de deslocamentos.

8.4.2 Para os casos não previstos nesta Norma, o dimensionamento pode ser feito com base em ensaios, conforme Seção 11.

9 Condições específicas para o dimensionamento de barras

9.1 Condições gerais

9.1.1 Aplicabilidade

Esta seção trata do dimensionamento de barras prismáticas submetidas a ações estáticas, exceto perfis tubulares com seção transversal circular, os quais devem ser dimensionados conforme a ABNT NBR 8800.

9.1.2 Valores máximos da relação largura-espessura

A relação largura-espessura de um elemento, desconsiderando enrijecedores intermediários, não deve ultrapassar os valores estabelecidos na Tabela 4.

Tabela 4 — Valores máximos da relação largura-espessura

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ^a
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{\max} = 60$ ^b
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_s \geq I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\max} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\max} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\max} = 500$ ^c
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\max} = 60$ ^b
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{\max} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\max} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\max} = 300$
^a b é a largura do elemento; t é a espessura.	
^b Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 30$.	
^c Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\max} = 250$.	

9.2 Flambagem local

9.2.1 Generalidades

A flambagem local pode ser considerada com base no método da largura efetiva, a partir do cálculo das larguras efetivas dos elementos totalmente ou parcialmente comprimidos, conforme 9.2.2 e 9.2.3, ou com base no método da seção efetiva, a partir do cálculo das propriedades geométricas efetivas da seção transversal das barras, calculadas diretamente conforme 9.7.2 b), 9.8.2.1 b) e 9.8.2.2 b).

9.2.2 Largura efetiva de elementos AA e AL

A largura efetiva de elementos totalmente ou parcialmente comprimidos deve ser calculada conforme 9.2.2.1 e 9.2.2.2, para os casos de cálculo do esforço resistente e de deslocamentos, respectivamente.

9.2.2.1 Cálculo do esforço resistente

A largura efetiva b_{ef} deve ser calculada conforme descrito a seguir:

- todos os elementos AA indicados na Tabela 5 e os elementos AL indicados na Tabela 6 sem inversão no sinal da tensão ($\psi \geq 0$):

$$b_{ef} = b \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$b_{ef} = b(1 - 0,22/\lambda_p) / \lambda_p \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

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

$$b_{ef} = b_c \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$b_{ef} = b_c(1 - 0,22/\lambda_p) / \lambda_p \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

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:

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

Para $\lambda_p \leq 0,673$ a largura efetiva é a própria largura do elemento;

σ_{cr} é a tensão convencional de flambagem elástica do elemento, dada por:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b/t)^2}$$

t é a espessura do elemento;

k é o coeficiente de flambagem local do elemento, calculado de acordo com a Tabela 5 para elementos AA ou de acordo com a Tabela 6 para elementos AL;

ν é o coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3;

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

a) 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 início do 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.

b) estado-limite último de instabilidade da barra

Se a barra for submetida à compressão, $\sigma = \chi f_y$, sendo χ o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global, conforme 9.7.2. Se a barra for submetida à flexão, $\sigma = \chi_{FLT} f_y$, sendo χ_{FLT} o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção, conforme 9.8.2.2.

9.2.2.2 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 associada à 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 9.2.2.1, substituindo λ_p por λ_{pd} .

onde:

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

K é o coeficiente de flambagem local do elemento, calculado de acordo com a Tabela 5 para elementos AA ou de acordo com a Tabela 6 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-limites de serviço conforme 6.7.3.

Tabela 5 — Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA

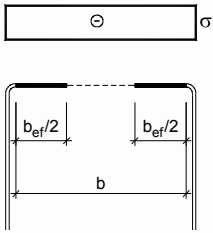
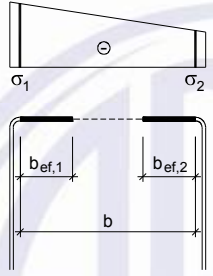
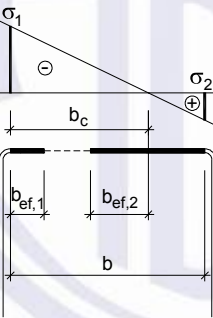
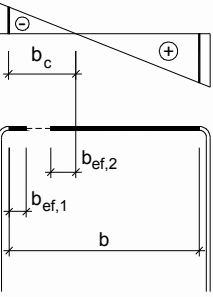
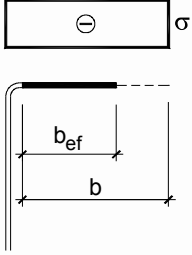
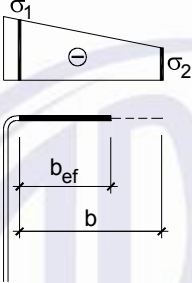
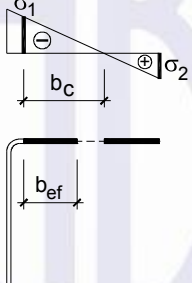
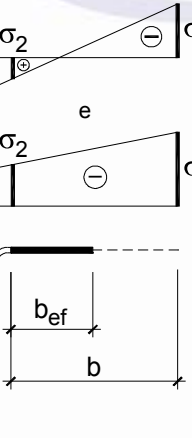
Caso a		$k = 4,0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1 - \psi) + 2(1 - \psi)^3$
Caso c	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef}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

Tabela 6 — Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AL

Caso a		$k = 0,43$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\psi + 0,34)$
Caso c	 <p>A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.</p>	$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
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.		

9.2.3 Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples

A largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples deve ser calculada conforme 9.2.3.1 e 9.2.3.2, para os casos de cálculo do esforço resistente e de deslocamentos, respectivamente.

9.2.3.1 Cálculo do esforço resistente

Para $\lambda_{p0} \leq 0,673$

NOTA Enrijecedor de borda não é necessário.

$$b_{ef} = b$$

$$d_s = d_{ef}$$

Para $\lambda_{p0} > 0,673$

$$b_{ef,1} = (I_s/I_a)(b_{ef}/2) \leq (b_{ef}/2)$$

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

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

onde

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

I_s é o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centróide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido. A região da dobra entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada parte integrante do enrijecedor. Portanto, para o enrijecedor representado na Figura 2:

$$I_s = (td^3 \sin^2 \theta)/12$$

I_a é o momento de inércia de referência do enrijecedor borda, dado por:

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

σ é a tensão normal definida em 9.2.2.1;

b é a largura do elemento (Figura 2);

b_{ef} é a largura efetiva do elemento, calculada conforme 9.2.2.1, com o seguinte valor de k :

— para $D/b \leq 0,25$

$$k = 3,57(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4 \quad (\text{considerar } I_s/I_a \leq 1)$$

— para $0,25 < D/b \leq 0,8$

$$k = (4,82 - 5D/b)(I_s/I_a)^n + 0,43 \leq 4 \quad (\text{considerar } I_s/I_a \leq 1)$$

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

$b_{ef,1}$ e $b_{ef,2}$ são as parcelas da largura efetiva do elemento (Figura 2);

D é a dimensão nominal do enrijecedor de borda (Figura 2);

d é a largura do enrijecedor de borda (Figura 2);

d_{ef} é a largura efetiva do enrijecedor calculada conforme 9.2.2.1 (Figura 2);

d_s é a largura efetiva reduzida do enrijecedor e adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil (Figura 2);

θ é o ângulo formado pelo elemento e o enrijecedor de borda, sendo $40^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$.

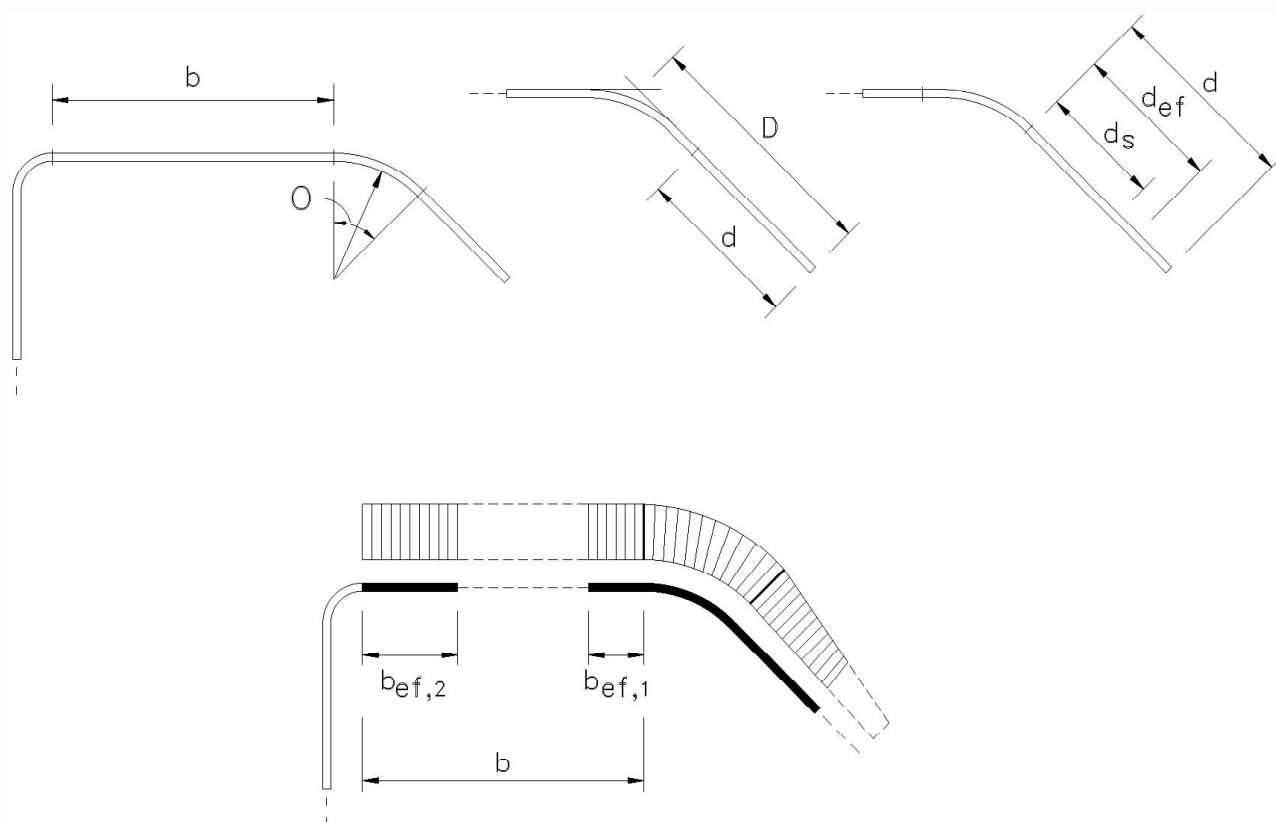


Figura 2 — Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda simples

9.2.3.2 Cálculo de deslocamentos

Deve ser adotado o mesmo procedimento estabelecido em 9.2.3.1, substituindo σ por σ_n , que é a tensão calculada considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço conforme 6.7.3.

9.3 Flambagem distorcional

As seções transversais de barras podem apresentar flambagem distorcional, conforme ilustrado na Figura 3. Dependendo da forma da seção e das dimensões dos elementos, o modo de flambagem distorcional pode corresponder ao modo crítico, devendo, portanto, ser considerado no dimensionamento, conforme 9.7.3 para barras submetidas à compressão centrada ou 9.8.2.3 para barras submetidas à flexão.

Para barras isoladas (Figuras 3a a 3d), o cálculo dos esforços críticos de flambagem elástica distorcional pode ser feito com base na teoria da estabilidade elástica, ou conforme formulação direta aproximada, desde que esteja garantida correlação adequada com os resultados teóricos. Para barras com painel conectado à mesa tracionada e a mesa comprimida livre (Figura 3e) é recomendado o procedimento do Anexo F.

Os perfis U simples (sem enrijecedores de borda) não são passíveis de flambagem distorcional, dispensando-se portanto tal verificação nesse caso, exceto em perfis submetidos à flexão com painel conectado à mesa tracionada e a mesa comprimida livre, onde a flambagem distorcional do conjunto alma-mesa comprimida pode corresponder ao modo crítico. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada.

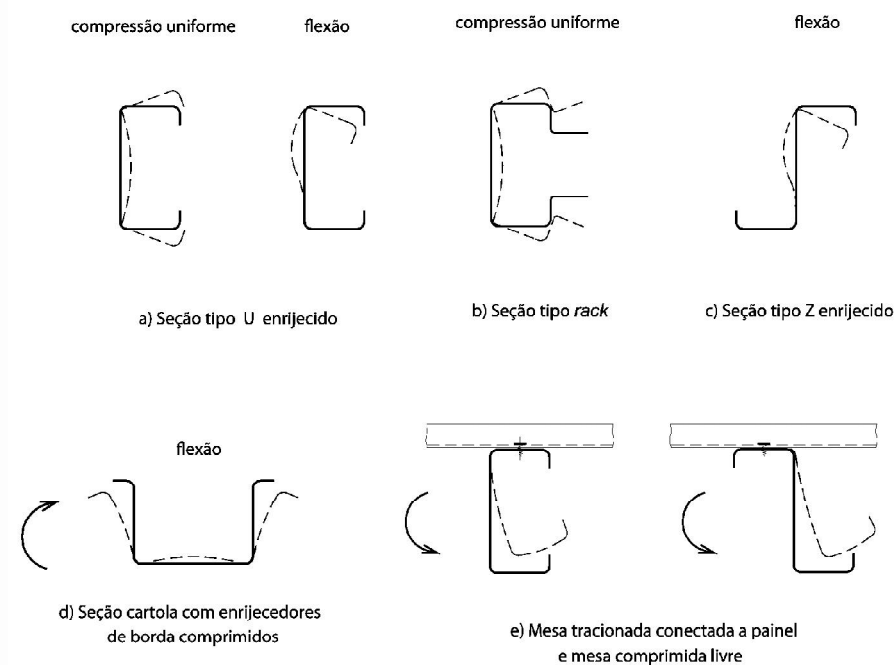


Figura 3 — Exemplos de flambagem distorcional da seção transversal

9.4 Efeito *shear lag*

Para vigas com comprimento L inferior a $30 b_{f0}$, submetidas a uma força concentrada ou várias forças concentradas com espaçamento superior a $2 b_{f0}$, 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 7. Para a mesa comprimida, tal largura efetiva não pode ultrapassar a determinada com base na flambagem local conforme 9.2.2 ou 9.2.3.

Tabela 7 — Fatores de redução da largura da mesa

L/b_{f0}	Fatores de redução	L/b_{f0}	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_{f0} 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_{f0} deve ser tomada como a largura livre da mesa mais a largura nominal do enrijecedor de borda.

9.5 Enrijecedores transversais

9.5.1 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 D), ou ainda nos casos onde as almas sejam ligadas a outras vigas ou pilares. A força axial resistente de cálculo de enrijecedores transversais $N_{s,Rd}$ deve ser calculada por:

a) enrijecedores tracionados: $N_{s,Rd} = Af_y / \gamma$ ($\gamma = 1,10$)

b) enrijecedores comprimidos: $N_{s,Rd} = \chi Af_y / \gamma$ ($\gamma = 1,10$)

onde

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global de uma barra hipotética, conforme 9.7.2, com comprimento efetivo de flambagem KL igual a 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;

$A = 18t^2 + A_s$ 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

9.5.2 Enrijecedores transversais força cortante

Os enrijecedores transversais para força cortante, previstos em 9.8.3 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:

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

9.6 Barras submetidas à força axial de tração

9.6.1 Esta subseção aplica-se a barras submetidas à força axial de tração. No dimensionamento deve ser atendida a seguinte condição:

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

onde

$N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo, determinada conforme 9.6.2.

Devem ainda ser observadas as considerações estabelecidas em 9.6.3, relacionadas à limitação de esbeltez.

9.6.2 A força axial de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ é o menor dos valores obtidos considerando-se os estados-limites últimos de escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida fora da região da ligação e ruptura da seção líquida na região da ligação, de acordo com as expressões indicadas a seguir:

a) para escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

b) para ruptura na seção líquida fora da região da ligação

$$N_{t,Rd} = A_{n0} f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,35)$$

c) para ruptura da seção líquida na região da ligação

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

onde

A é a área bruta da seção transversal da barra;

A_{n0} é a área líquida da seção transversal da barra fora da região da ligação (por exemplo, decorrente de furos ou recortes que não estejam associados à ligação da barra);

A_n é a área líquida da seção transversal da barra na região da ligação, sendo que:

Para chapas com ligações parafusadas em *zig-zag*, devem ser analisadas as prováveis linhas de ruptura (Figura 4a), sendo a seção crítica aquela correspondente ao menor valor da área líquida. A área líquida da seção de ruptura analisada deve ser calculada por:

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

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 Tabela 15;

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

s é o espaçamento dos furos na direção da solicitação (Figura 4a);

g é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação (Figura 4a);

t é a espessura da parte conectada analisada;

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

1) chapas com ligações parafusadas:

— um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal:

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

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

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

— 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:

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

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 *zig-zag*, com g inferior a $3d$, C_t deve ser calculado tomando-se g igual ao maior valor entre $3d$ e a soma $e_1 + e_2$.

2) chapas com ligações soldadas:

— soldas longitudinais associadas a soldas transversais:

$$C_t = 1,0$$

— somente soldas longitudinais ao longo de ambas as bordas:

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

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

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

3) perfis com ligações parafusadas:

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

$$C_t = 1,0$$

- todos os parafusos contidos em uma única seção transversal (incluindo o caso particular de um único parafuso na ligação), o perfil deve ser tratado como chapa equivalente (Figura 4b), conforme alínea a), com C_t dado por:

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

- cantoneiras e perfis U com dois ou mais parafusos na direção da solicitação, sendo que nem todos os elementos estão conectados (Figura 4c):

$$C_t = 1,0 - 1,2(x/L) \text{ (devendo, no entanto ser usado 0,9 como limite superior, e não se permitindo o uso de ligações que resultem em um valor inferior a 0,4)}$$

4) perfis com ligações soldadas:

- apenas soldas transversais:

$$C_t = 1,0$$

- todos os elementos conectados por soldas longitudinais ou por uma combinação de soldas longitudinais e transversais:

$$C_t = 1,0$$

- cantoneiras com soldas longitudinais (Figura 4d):

$$C_t = 1,0 - 1,2(x/L) \text{ (devendo, no entanto, ser usado 0,9 como limite superior, e não se permitindo o uso de ligações que resultem em um valor inferior a 0,4)}$$

- perfis U com soldas longitudinais (Figura 4d):

$$C_t = 1,0 - 0,36(x/L) \text{ (devendo, no entanto, ser usado 0,9 como limite superior, e não se permitindo o uso de ligações que resultem em um valor inferior a 0,5)}$$

onde

b é a largura da chapa;

L é o comprimento da ligação parafusada (Figura 4c) ou o comprimento da solda (Figura 4d);

x é a excentricidade da ligação, tomada como a distância entre o centróide da seção da barra e o plano de cisalhamento da ligação (Figuras 4c e 4d). No caso de perfil U conectado pelas mesas por meio de parafusos, a excentricidade da ligação deve ser determinada substituindo o perfil U por duas cantoneiras fictícias, obtidas dividindo-se o perfil U por um plano paralelo às mesas, na altura do seu centróide.

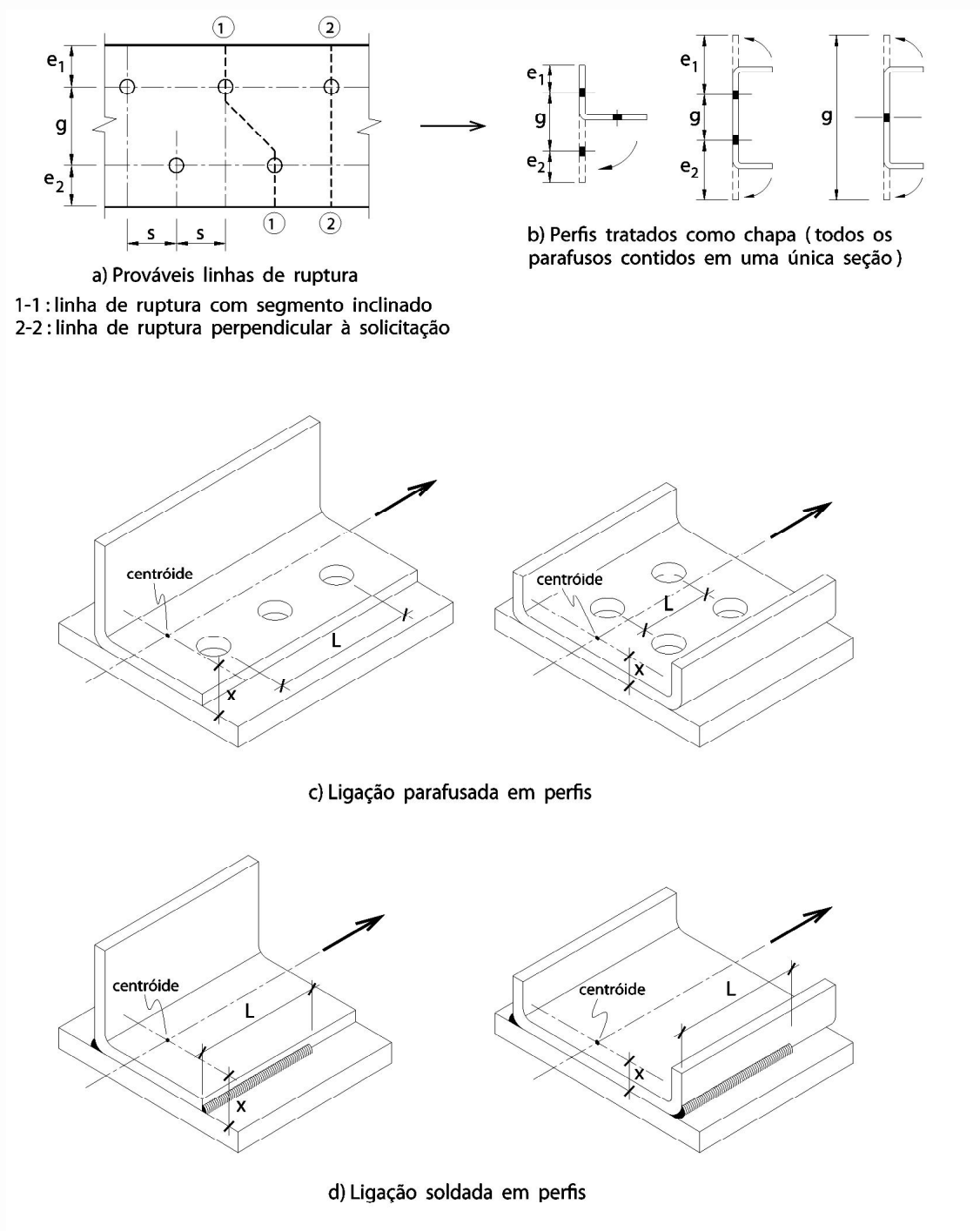


Figura 4 — Linhas de ruptura e grandezas para cálculo do coeficiente C_t

9.6.3 Recomenda-se que o índice de esbeltez das barras tracionadas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração correspondente (L/r) 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.

9.7 Barras submetidas à força axial de compressão

9.7.1 Generalidades

Esta subseção aplica-se a barras submetidas à força axial de compressão. No dimensionamento deve ser atendida a seguinte condição:

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

onde

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

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo, tomada como o menor valor calculado em 9.7.2 e 9.7.3.

Devem ainda ser observadas as considerações estabelecidas em 9.7.4 e 9.7.5, relacionadas à limitação de esbeltez e às barras compostas.

9.7.2 Flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção

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

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,20)$$

onde

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global, calculado conforme indicado a seguir ou obtido diretamente da Tabela 8 para os casos em que λ_0 não supere 3,0;

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

— para $\lambda_0 > 1,5$: $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, dado por:

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

N_e é a força axial de flambagem global elástica, conforme 9.7.2.1, 9.7.2.2 ou 9.7.2.3;

A é a área bruta da seção transversal da barra;

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base em uma das duas opções apresentadas a seguir:

a) no método da largura efetiva (MLE), conforme 9.2.2 e 9.2.3, adotando $\sigma = \chi f_y$;

b) no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$A_{ef} = A \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,776$$

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_p > 0,776$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_\ell} \right)^{0,5}$$

N_ℓ é a força axial de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta, segundo a expressão:

$$N_\ell = k_\ell \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} A$$

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa, k_ℓ , podem ser calculados pelas expressões indicadas na Tabela 9 ou obtidos diretamente da Tabela 10. Os valores da Tabela 10 são mais precisos que os fornecidos pelas expressões da Tabela 9, uma vez que correspondem a valores obtidos diretamente da análise geral de estabilidade elástica.

Tabela 8 — Valores de χ em função do índice de esbeltez reduzido λ_0

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

Tabela 9 — Coeficiente de flambagem local k_t para a seção completa em barras sob compressão centrada

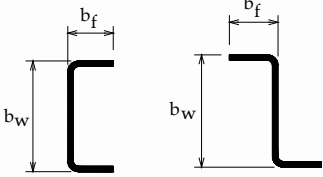
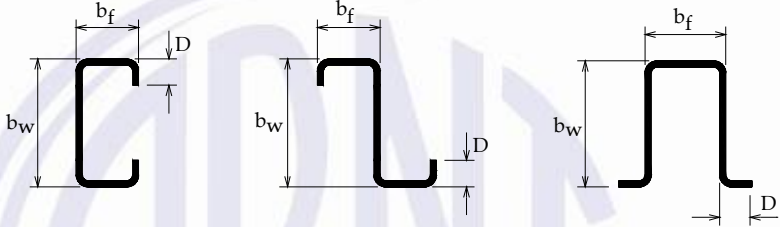
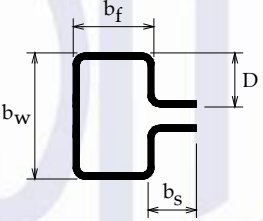
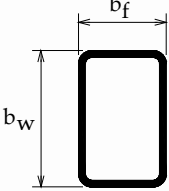
Caso a	<p>Seção U simples e Seção Z simples</p>  $k_t = 4,0 + 3,4 \eta + 21,8 \eta^2 - 174,3 \eta^3 + 319,9 \eta^4 - 237,6 \eta^5 + 63,6 \eta^6$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
Caso b	<p>Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola</p>  $k_t = 6,8 - 5,8 \eta + 9,2 \eta^2 - 6,0 \eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0 \text{ e } 0,1 \leq D/b_w \leq 0,3)$
Caso c	<p>Seção rack</p>  $k_t = 6,5 - 3,0 \eta + 2,8 \eta^2 - 1,6 \eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0 ; 0,1 \leq D/b_w \leq 0,3 \text{ e } 0,1 \leq b_s/b_w \leq 0,4)$
Caso d	<p>Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_t deve ser calculado para cada perfil isoladamente).</p>  $k_t = 6,6 - 5,8 \eta + 8,6 \eta^2 - 5,4 \eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
<p>NOTA 1 b_f, b_w, b_s e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente.</p> <p>NOTA 2 $\eta = b_f / b_w$.</p>	

Tabela 10 — Valores do coeficiente de flambagem local k_ℓ para barras sob compressão centrada

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b	Caso c	Caso d
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola	Seção <i>rack</i>	Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
0,1	4,25	-	-	-
0,2	4,52	6,04	-	5,67
0,3	4,33	5,73	5,76	5,44
0,4	3,71	5,55	5,61	5,29
0,5	2,88	5,40	5,47	5,16
0,6	2,17	5,26	5,35	5,03
0,7	1,67	5,11	5,23	4,87
0,8	1,32	4,89	5,10	4,66
0,9	1,06	4,56	4,85	4,37
1,0	0,88	4,10	4,56	4,00
NOTA 1	b_f , b_w , b_s e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.			
NOTA 2	Para o caso b, os valores são válidos para $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$.			
NOTA 3	Para o caso c, os valores são válidos para $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$ e $0,1 \leq b_s/b_w \leq 0,4$.			
NOTA 4	Para valores intermediários, interpolar linearmente.			

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

A força axial de flambagem global elástica N_e é o menor valor dentre os obtidos por a), b) e c):

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

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

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

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

c) força axial de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

onde

C_w é a constante de empenamento da seção;

E é o módulo de elasticidade;

G é o módulo de elasticidade transversal;

J é a constante de torção da seção;

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

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

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

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

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

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

x_0 e y_0 são as distâncias do centro de torção ao centróide, na direção dos eixos principais x e y , respectivamente.

9.7.2.2 Perfis monossimétricos

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

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

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

b) força axial de flambagem global elástica por flexo-torção:

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

onde

N_{ex} e N_{ez} são as forças axiais de flambagem global elástica conforme 9.7.2.1 a) e 9.7.2.1 c), respectivamente;

r_0 e x_0 são conforme definidos em 9.7.2.1.

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)

9.7.2.3 Perfis assimétricos

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

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

onde:

N_{ex} , N_{ey} , N_{ez} , x_0 , y_0 e r_0 são conforme definidos em 9.7.2.1.

9.7.3 Flambagem distorcional

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem distorcional, conforme 9.3, a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \chi_{dist} A f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,20)$$

onde

χ_{dist} é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional, calculado por:

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

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

A é área bruta da seção transversal da barra;

$\lambda_{dist} = (A f_y / N_{dist})^{0,5}$ é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica, a qual deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica.

Para barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido, se a relação D/b_w for igual ou superior aos valores indicados na Tabela 11, a verificação da flambagem distorcional pode ser dispensada.

Tabela 11 — Valores mínimos da relação D/b_w de barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido submetidas à compressão centrada, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

	b_w/t				
b_f/b_w	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
NOTA 1 b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.					
NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.					

9.7.4 Limitação de esbeltez

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

9.7.5 Barras compostas comprimidas

Para barras compostas comprimidas, isto é, aquelas constituídas por um ou mais perfis associados, além de atender ao disposto em 9.7.4, 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. Nesse 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. O procedimento do EN 1993-1-1 pode ser empregado para a consideração desse efeito.

9.8 Barras submetidas à flexão simples

9.8.1 Generalidades

Esta subseção aplica-se a barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante. No dimensionamento devem ser atendidas as seguintes condições:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

onde

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

M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo, determinado conforme 9.8.2;

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

V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo, determinada conforme 9.8.3.

Para momento fletor e força cortante combinados, devem ser atendidas as considerações estabelecidas em 9.8.4.

Para barras compostas, devem ser atendidas as considerações estabelecidas em 9.8.6.

Devem ainda ser verificados todos os estados-limites de serviço aplicáveis, conforme prescrições desta Norma.

9.8.2 Momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor calculado em 9.8.2.1, 9.8.2.2 e 9.8.2.3, onde aplicável.

9.8.2.1 Início de escoamento da seção efetiva

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

onde

W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento, calculado com base em uma das duas opções apresentadas a seguir:

- no método da largura efetiva (MLE), conforme 9.2.2 e 9.2.3, com a tensão σ calculada para o estado-limite último de início de escoamento da seção efetiva;
- no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$W_{ef} = W \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{ef} = W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

$$\lambda_p = \left(\frac{W f_y}{M_\ell} \right)^{0,5}$$

M_ℓ é o momento fletor de flambagem local elástica, calculado por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta, segundo a expressão seguinte:

$$M_\ell = k_\ell \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} W_c$$

W é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

W_c é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa, k_ℓ , podem ser calculados pelas expressões indicadas na Tabela 12 ou obtidos diretamente da Tabela 13.

Tabela 12 — Coeficiente de flambagem local k_t para a seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia

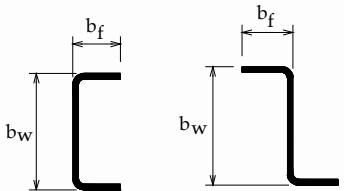
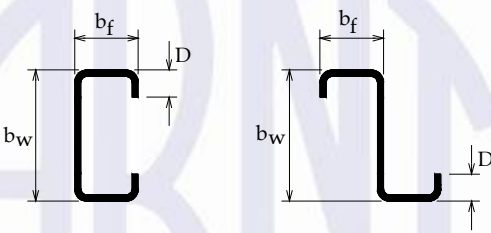
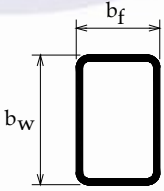
Caso a	<p>Seção U simples e Seção Z simples</p>  $k_t = \eta^{-1,843}$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
Caso b	<p>Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido</p>  <p>As expressões a seguir são válidas para $0,2 \leq \eta \leq 1,0$ e para os valores de μ indicados</p> $k_t = a - b(\mu - 0,2)$ $a = 81 - 730\eta + 4\,261\eta^2 - 12\,304\eta^3 + 17\,919\eta^4 - 12\,796\eta^5 + 3\,574\eta^6$ $b = 0 \quad \text{para } 0,1 \leq \mu \leq 0,2 \text{ e } 0,2 \leq \eta \leq 1,0$ $b = 0 \quad \text{para } 0,2 < \mu \leq 0,3 \text{ e } 0,6 < \eta \leq 1,0$ $b = 320 - 2\,788\eta + 13\,458\eta^2 - 27\,667\eta^3 + 19\,167\eta^4 \text{ para } 0,2 < \mu \leq 0,3 \text{ e } 0,2 \leq \eta \leq 0,6$
Caso c	<p>Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_t deve ser calculado para cada perfil isoladamente).</p>  $k_t = 14,5 + 178\eta - 602\eta^2 + 649\eta^3 - 234\eta^4$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
NOTA 1	<p>b_f, b_w e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente.</p>
NOTA 2	<p>$\eta = b_f / b_w$.</p>
NOTA 3	<p>$\mu = D/b_w$.</p>

Tabela 13 — Valores do coeficiente de flambagem local k_e da seção completa em barras sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia

$\eta = b_f / b_w$	Caso a	Caso b			Caso c
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido e Seção Z enrijecido			Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
		$\mu \leq 0,2$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$	
0,2	18,4	32,0	25,8	21,2	31,0
0,3	9,6	29,3	23,8	19,7	28,9
0,4	5,6	24,8	20,7	18,2	25,6
0,5	3,6	18,7	17,6	16,0	19,5
0,6	2,6	13,6	13,3	13,0	14,2
0,7	1,9	10,2	10,1	10,1	10,6
0,8	1,5	7,9	7,9	7,9	8,2
0,9	1,2	6,2	6,3	6,3	6,6
1,0	1,0	5,1	5,1	5,1	5,3
NOTA 1 b_f , b_w e D são a largura nominal da mesa, da alma e do enrijecedor de borda, respectivamente.					
NOTA 2 $\mu = D/b_w$.					
NOTA 3 Para valores intermediários interpolar linearmente.					

9.8.2.2 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:

$$M_{Rd} = \chi_{FLT} W_{c,ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

onde

$W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida, calculado com base em uma das duas opções apresentadas a seguir:

- no método da largura efetiva (MLE), conforme 9.2.2 e 9.2.3, adotando $\sigma = \chi_{FLT} f_y$;
- no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$W_{c,ef} = W_c \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673$$

$$W_{c,ef} = W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \frac{1}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi_{FLT} W_c f_y}{M_{\ell}} \right)^{0,5}$$

M_ℓ é o momento fletor de flambagem local elástica, calculado por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta, segundo a expressão seguinte:

$$M_\ell = k_\ell \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} W_c$$

Os valores do coeficiente de flambagem local para a seção completa, k_ℓ , podem ser calculados pelas expressões indicadas na Tabela 12 ou obtidos diretamente da Tabela 13.

χ_{FLT} é o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção, calculado por:

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

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

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

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):

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

Em barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, M_e pode ser calculado com base no Anexo E.

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

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

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

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

N_{ey} , N_{ez} e r_0 são conforme 9.7.2.1, considerando $K_y L_y = L_y$ e $K_z L_z = L_z$. Valores de $K_y L_y$ e $K_z L_z$ inferiores a L_y e L_z , 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 $K_z L_z$ podem resultar maiores que L_y e L_z respectivamente, em função das condições de vínculo, por exemplo, em barras contínuas conectadas apenas pela mesa tracionada, portanto com deslocamentos laterais, rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento parcialmente impedidos no apoio. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada;

C_b é o fator de modificação para momento fletor não uniforme, que a favor da segurança pode ser tomado igual a 1,0 ou calculado pela seguinte expressão:

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

Para balanços com a extremidade livre sem contenção lateral, C_b deve ser tomado igual a 1,0;

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

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

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

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

9.8.2.3 Flambagem distorcional

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem distorcional, conforme 9.3, o momento fletor resistente de cálculo deve ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_{Rd} = \chi_{dist} W f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

onde

χ_{dist} é o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional, calculado por:

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

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

$\lambda_{dist} = (W f_y / M_{dist})^{0,5}$ é o índice de esbeltez reduzido referente à flambagem distorcional;

W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional elástica, o qual deve ser calculado com base na análise de estabilidade elástica.

Para barras com seção U enrijecido e seção Z enrijecido, sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, se a relação D/b_w for igual ou superior aos valores indicados na Tabela 14, a verificação da flambagem distorcional pode ser dispensada.

Tabela 14 — Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, para dispensar a verificação da flambagem distorcional

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
NOTA 1 b_f , b_w , e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas figuras da Tabela 9.					
NOTA 2 Para valores intermediários, interpolar linearmente.					

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.

9.8.3 Força cortante

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

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

$$V_{Rd} = 0,6f_y h t / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

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

$$V_{Rd} = 0,65t^2(k_v f_y E)^{0,5} / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

— para $h/t > 1,4(Ek_v/f_y)^{0,5}$

$$V_{Rd} = [0,905Ek_v t^3 / h] / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

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, ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,0$$

— para alma com enrijecedores transversais satisfazendo as exigências de 9.5:

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}$$

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.

9.8.4 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:

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

Para barras com enrijecedores transversais de alma, além de serem atendidas as exigências de 9.8.2.1 e 9.8.3, quando $M_{Sd}/M_{Rd} > 0,5$ e $V_{Sd}/V_{Rd} > 0,7$ deve ser satisfeita a seguinte expressão de interação:

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

onde

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

M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo conforme 9.8.2.1;

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

V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo conforme 9.8.3.

9.8.5 Cálculo de deslocamentos

O cálculo de deslocamentos deve ser feito considerando a redução de rigidez associada à flambagem local, por meio de um momento de inércia efetivo da seção I_{ef} obtido com base em uma das duas opções apresentadas a seguir:

- no método da largura efetiva (MLE), conforme 9.2.2 e 9.2.3, adotando $\sigma = \sigma_n$, sendo σ_n a tensão normal de compressão calculada com base nas combinações de ações para os estados-limites de serviço conforme 6.7.3;
- no método da seção efetiva (MSE), conforme indicado a seguir:

$$I_{ef} = I_g \quad \text{para } \lambda_{pd} \leq 0,673$$

$$I_{ef} = I_g \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{pd}} \right) \frac{1}{\lambda_{pd}} \quad \text{para } \lambda_{pd} > 0,673$$

onde

$$\lambda_{pd} = \left(\frac{M_n}{M_\ell} \right)^{0,5}$$

M_n é momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço, conforme 6.7.3;

M_ℓ é o momento fletor de flambagem local elástica, conforme 9.8.2;

I_g é o momento de inércia da seção bruta.

9.8.6 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 simples ou U enrijecido, para formar um perfil I, não deve ser maior que o seguinte valor:

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

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 5). Se a ligação for executada junto às mesas dos perfis, g é igual à altura da barra;

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 10;

m a distância do centro de torção de um perfil U ao plano médio da sua alma (ver Figura 5);

q o valor de cálculo da força uniformemente distribuída de referência, igual a três vezes o valor de cálculo a 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} 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_{\max} 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.

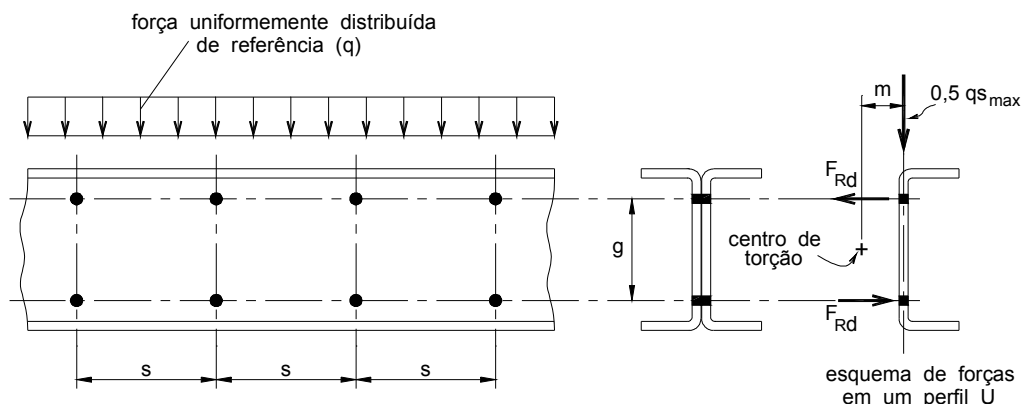


Figura 5 — Perfil I obtido pela composição de dois perfis U

9.8.7 Vigas mistas de aço e concreto

O dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto constituídas por perfis formados a frio pode ser feito conforme Anexo G.

9.9 Barras submetidas à flexão composta

A força normal solicitante de cálculo e os momentos flettores solicitantes de cálculo devem satisfazer a expressão de interação indicada a seguir:

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

onde

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável, considerada constante na barra e oriunda da análise estrutural conforme 8.1;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos flettores solicitantes de cálculo, na seção considerada, em relação aos eixos x e y, respectivamente, e oriundos da análise estrutural conforme 8.1;

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável, determinada respectivamente conforme 9.6 ou 9.7;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos flettores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente, calculados conforme 9.8.2.

10 Condições específicas para o dimensionamento de ligações

10.1 Condições gerais

As ligações são constituídas pelos elementos de ligação (enrijecedores, cobrejuntas, chapas de nó, cantoneiras de assento, consoles etc.) e meios de ligação (soldas e parafusos). Esses componentes devem ser dimensionados de forma que os esforços resistentes de cálculo sejam iguais ou superiores aos máximos esforços solicitantes de cálculo, determinados com base nas combinações de ações para os estados-limites últimos estabelecidos em 6.7.2, observando o disposto em a) e b).

a) barras axialmente solicitadas

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

10.2 Ligações soldadas

10.2.1 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 ABNT NBR 8800. Para os casos de ligações soldadas não previstos nesta Norma ou na ABNT NBR 8800, devem ser obedecidas as exigências da AWS D1.1 ou AWS D1.3.

10.2.2 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:

$$F_{Rd} = L t_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

b) cisalhamento na seção efetiva:

$$F_{Rd} = L t_{ef} (0,6 f_w) / \gamma \quad (\gamma = 1,25), \text{ e}$$

$$F_{Rd} = L t_{ef} (0,6 f_y) / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

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.

10.2.3 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: sollicitação paralela ao eixo da solda:

— para $L/t < 25$:

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

— para $L/t \geq 25$:

$$F_{Rd} = 0,75tL f_u / \gamma \quad (\gamma = 2,00)$$

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

$$F_{Rd} = tL f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,55)$$

c) estado-limite último de ruptura da solda:

Além das forças resistentes de cálculo obtidas em a) e b) anteriores, para espessura $t > 2,5$ mm a força resistente de cálculo F_{Rd} não deve exceder o seguinte valor:

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

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 6;

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

w_1 e w_2 são as pernas do filete, conforme Figura 6. Nas juntas por sobreposição, $w_1 \leq t_1$.

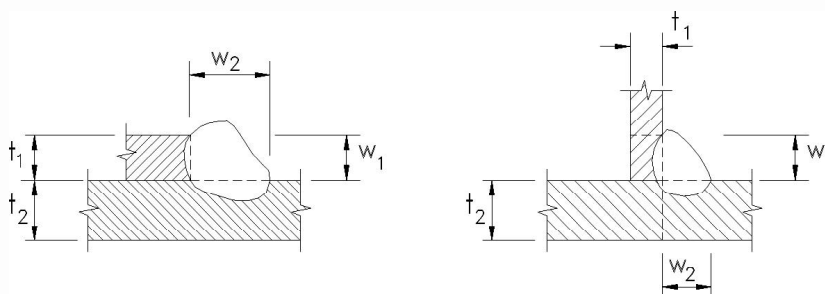


Figura 6 — Solda de filete em superfícies planas

10.2.4 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 7a)

$$F_{Rd} = 0,83 t L f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,65)$$

b) estado-limite último de ruptura do metal-base: solicitação paralela ao eixo da solda (Figuras 7b a 7g)

— para $t_{ef} \geq 2t$ e se a dimensão h do enrijecedor é maior ou igual ao comprimento da solda L (Figura 7d):

$$F_{Rd} = 1,50 t L f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,80)$$

— para $t \leq t_{ef} < 2t$ ou se a dimensão h do enrijecedor for menor que o comprimento da solda L (Figura 7e):

$$F_{Rd} = 0,75 t L f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,80)$$

c) estado-limite último de ruptura da solda:

Além das forças resistentes de cálculo obtidas em a) e b) anteriores, para espessura $t > 2,5$ mm a força resistente de cálculo F_{Rd} não deve exceder o seguinte valor:

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

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 7a a 7g;

r_e é o raio externo de dobramento conforme Figuras 7d a 7g;

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

— face externa do filete rente ao metal-base (Figuras 7d e 7e):

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

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

— face externa do filete saliente ao metal-base (Figuras 7f e 7g):

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

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

w_1 e w_2 são as pernas do filete, conforme Figuras 7d a 7g.

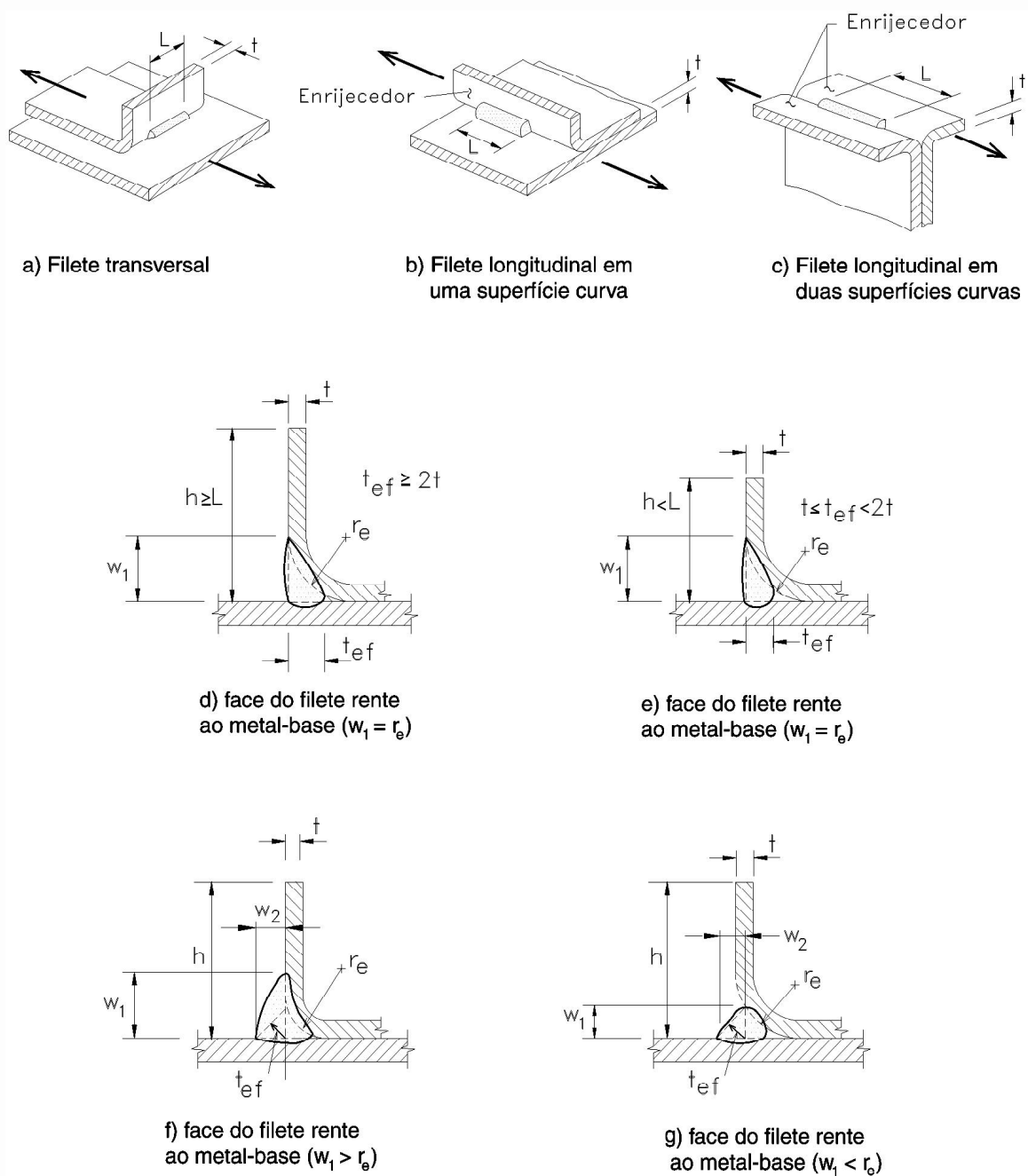


Figura 7 — Solda de filete em superfícies curvas

10.3 Ligações parafusadas

10.3.1 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 ABNT NBR 8800.

10.3.2 Dimensões dos furos

As dimensões dos furos para introdução dos parafusos não devem exceder às especificadas na Tabela 15. 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 15 — Dimensões máximas de furos (mm)

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

10.3.3 Disposições construtivas

10.3.3.1 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.

10.3.3.2 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.

10.3.4 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda

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

$$F_{Rd} = t e f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,45)$$

onde

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

t é a espessura do componente elemento 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.

10.3.5 Pressão de contato (esmagamento)

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

$$F_{Rd} = \alpha_e d t f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,55)$$

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;

α_e é um fator igual a $(0,183t + 1,53)$, com t em milímetros ($t \leq 4,75$ mm).

10.3.6 Força de tração resistente de cálculo do parafuso

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

$$F_{t,Rd} = 0,75A_b f_{ub} / \gamma \quad (\gamma = 1,35)$$

onde

A_b é a área bruta da seção transversal do parafuso;

f_{ub} é a resistência à ruptura do parafuso na tração, conforme Tabela 16 ou o disposto em 4.4.

10.3.7 Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso

A força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso $F_{v,Rd}$, por plano de corte, deve ser calculada por:

a) quando plano de corte passa pela rosca

$$F_{v,Rd} = 0,4A_b f_{ub} / \gamma \quad (\gamma = 1,35)$$

b) quando plano de corte não passa pela rosca

$$F_{v,Rd} = 0,5A_b f_{ub} / \gamma \quad (\gamma = 1,35)$$

onde

A_b e f_{ub} conforme definidos em 10.3.6.

10.3.8 Tração e cisalhamento combinados

Quando ocorrer ação simultânea de tração e cisalhamento, devem ser atendidas as seguintes condições:

a) parafusos de aço com qualificação estrutural (comuns ou de alta resistência):

$$(F_{t,Sd} / F_{t,Rd})^2 + (F_{v,Sd} / F_{v,Rd})^2 \leq 1,0$$

b) parafusos de aço sem qualificação estrutural, conforme 4.4:

$$(F_{t,Sd} / F_{t,Rd}) + (F_{v,Sd} / F_{v,Rd}) \leq 1,0$$

onde

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

$F_{v,Sd}$ é a força de cisalhamento solicitante de cálculo no parafuso, no plano de corte analisado;

$F_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo do parafuso, conforme 10.3.6;

$F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso, conforme 10.3.7.

Tabela 16 — Resistência à ruptura na tração de parafusos de aço com qualificação estrutural

Especificação	Classe	Diâmetro nominal d		f_{ub} MPa
		milímetros	polegadas	
ASTM A307-07b	Comum	-	$1/4 \leq d < 1/2$	370
			$1/2 \leq d \leq 4$	415
ASTM A325M	Alta resistência	$16 \leq d \leq 24$	$1/2 \leq d \leq 1$	825
		$24 < d \leq 36$	$1 < d \leq 1\frac{1}{2}$	725
ASTM A354 (grau BD)	Alta resistência	-	$1/4 \leq d < 1/2$	930
ASTM A394 (tipo 0)	Comum	-	$1/2 \leq d \leq 1$	510
ASTM A394 (tipos 1,2 e 3)	Alta resistência	-	$1/2 \leq d \leq 1$	825
ASTM A449	Alta resistência	-	$1/4 \leq d < 1/2$	745
ASTM A490	Alta resistência	$16 \leq d \leq 36$	$1/2 \leq d \leq 1\frac{1}{2}$	1 035
ISO 898-1 classe 4.6	Comum	$6 \leq d \leq 36$	-	400
ISO 4016 – classe 8.8	Alta resistência	$6 \leq d \leq 36$	-	800
ISO 4016 – classe 10.9	Alta resistência	$6 \leq d \leq 36$	-	1 000

10.4 Colapso por rasgamento

Nas ligações de extremidade de vigas, onde apenas uma ou as duas mesas são recortadas (ver Figura 8a), em cantoneiras tracionadas (ver Figura 8b) ou em outros casos de ligações onde houver a possibilidade de colapso por rasgamento da parte conectada, a força resistente de cálculo F_{Rd} é o menor valor entre:

$$F_{Rd} = (0,6A_{gv}f_y + A_{nt}f_u)/\gamma \quad (\gamma = 1,65)$$

$$F_{Rd} = (0,6A_{nv}f_u + A_{nt}f_u)/\gamma \quad (\gamma = 1,65)$$

onde

A_{gv} é área bruta sujeita ao cisalhamento da parte suscetível ao colapso por rasgamento;

A_{nv} é a área líquida sujeita ao cisalhamento da parte suscetível ao colapso por rasgamento;

A_{nt} é a área líquida sujeita à tração da parte suscetível ao colapso por rasgamento.

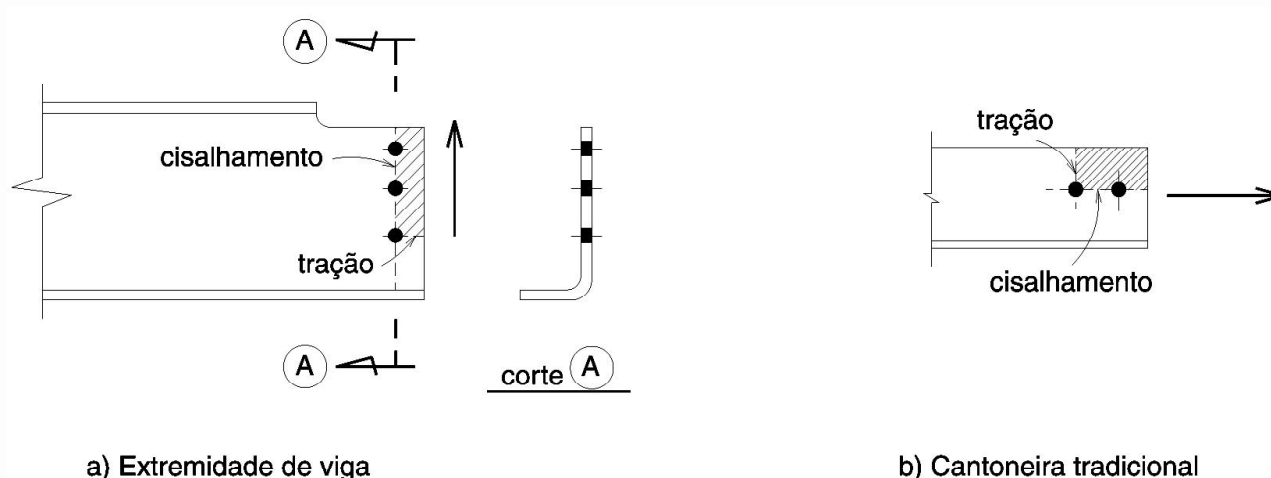


Figura 8 — Colapso por rasgamento da parte conectada

10.5 Ligações com parafusos auto-atarraxantes

Esta subseção é aplicável às ligações constituídas por parafusos auto-atarraxantes, providos ou não de ponta brocante, com diâmetro nominal entre 2,00 mm e 6,35 mm.

Para os parafusos submetidos à tração, o diâmetro da sua cabeça d_h ou da arruela d_w (se a arruela for utilizada), deve ser igual ou superior a 8 mm, e a arruela deve apresentar espessura mínima de 1,27 mm.

A instalação dos parafusos deve seguir criteriosamente as recomendações do fabricante.

Os símbolos e respectivos significados empregados nesta subseção estão apresentados a seguir:

d é o diâmetro nominal do parafuso;

d_h é o diâmetro da cabeça ou do flange do parafuso;

d_w é o diâmetro da arruela;

d_{we} é o diâmetro efetivo associado ao rasgamento do metal-base (*pull-over*);

e é a distância, tomada na direção da força, do centro do furo à extremidade do elemento conectado;

t é a espessura do elemento conectado (t_1 ou t_2);

t_1 é a espessura do elemento conectado em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso;

t_2 é a espessura do elemento conectado que não está em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso;

t_c é a profundidade de penetração ou a espessura t_2 , o que for menor;

f_u é a resistência à ruptura na tração do elemento conectado sujeito ao rasgamento entre furo e borda;

f_{u1} é a resistência à ruptura na tração do elemento conectado em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso;

f_{u2} é a resistência à ruptura na tração do elemento conectado que não está em contato com a arruela ou a cabeça do parafuso;

$F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo por parafuso (menor valor entre $F_{c,Rd}$ e $F_{ss,Rd}$);

$F_{c,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo por parafuso, associada à resistência do metal-base;

$F_{ss,Rk}$ é a força de cisalhamento resistente nominal do parafuso, fornecida pelo fabricante ou determinada por ensaio;

$F_{ss,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso;

$F_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo por parafuso (menor valor entre $F_{a,Rd}$; $F_{r,Rd}$ e $F_{ts,Rd}$);

$F_{a,Rd}$ é força de tração resistente de cálculo, associada ao arrancamento do parafuso (*pull-out*);

$F_{r,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo, associada ao rasgamento do metal-base (*pull-over*);

$F_{ts,Rk}$ é a força de tração resistente nominal do parafuso, fornecida pelo fabricante ou determinada por ensaio;

$F_{ts,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo do parafuso;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 2,00 (exceto em 10.5.4 ou quando determinado por ensaio conforme permitido em 10.5.2.2 e 10.5.3.3).

10.5.1 Disposições construtivas

A distância entre centros de parafusos adjacentes não deve ser inferior a $3d$ e a distância do centro do parafuso à borda de qualquer elemento conectado não deve ser inferior a $1,5d$.

10.5.2 Força de cisalhamento resistente de cálculo

A força de cisalhamento resistente de cálculo por parafuso ($F_{v,Rd}$) é o menor valor obtido em 10.5.2.1 e 10.5.2.2.

10.5.2.1 Resistência do metal-base

a) para $t_2/t_1 \leq 1,0$, $F_{c,Rd}$ é o menor dos valores:

$$F_{c,Rd} = 4,2(t_2^3 d)^{0,5} f_{u2} / \gamma$$

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_1 d f_{u1} / \gamma$$

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_2 d f_{u2} / \gamma$$

b) para $t_2/t_1 \geq 2,5$, $F_{c,Rd}$ é o menor dos valores:

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_1 d f_{u1} / \gamma$$

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_2 d f_{u2} / \gamma$$

c) para $1,0 < t_2/t_1 < 2,5$, $F_{c,Rd}$ deve ser determinada por interpolação linear.

Se a distância entre o parafuso e a extremidade de um elemento conectado for paralela à direção da força, estando portanto a ligação sujeita ao estado-limite último de rasgamento entre furo e borda, adicionalmente, o valor de $F_{c,Rd}$ não deve ser superior a:

$$F_{c,Rd} = t e f_u / \gamma$$

10.5.2.2 Resistência do parafuso ao cisalhamento

A força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso deve ser tomada como:

$$F_{ss,Rd} = F_{ss,Rk} / \gamma$$

onde

$F_{ss,Rk}$ é a força de cisalhamento resistente nominal do parafuso, fornecida pelo fabricante ou determinada por ensaio;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência, tomado igual a 2,00 ou determinado com base em ensaios conforme seção 11. Nesse caso, deve-se multiplicar o valor calculado de γ por 1,25, não sendo necessário adotar valor superior a 2,00.

10.5.3 Força de tração resistente de cálculo

A força de tração resistente de cálculo por parafuso $F_{t,Rd}$ é o menor valor obtido em 10.5.3.1, 10.5.3.2 e 10.5.3.3.

10.5.3.1 Resistência ao arrancamento do parafuso (*pull-out*)

A força de tração resistente de cálculo, associada ao arrancamento do parafuso, deve ser calculada por:

$$F_{a,Rd} = 0,85 t_c d f_{u2} / \gamma$$

10.5.3.2 Resistência ao rasgamento do metal-base (*pull-over*)

A força de tração resistente de cálculo, associada ao rasgamento do metal-base, deve ser calculada por:

$$F_{r,Rd} = 1,5 t_1 d_{we} f_{u1} / \gamma$$

onde d_{we} é o diâmetro efetivo associado ao rasgamento do metal-base, calculado por:

a) parafuso de cabeça circular, ou hexagonal, ou hexagonal com flange, com arruela independente sob a cabeça do parafuso (Figura 9a):

$$d_{we} = d_h + 2t_w + t_1 \leq d_w$$

b) parafuso de cabeça circular, ou hexagonal, ou hexagonal com flange, sem arruela independente sob a cabeça do parafuso (Figura 9b):

$$d_{we} = d_h, \text{ porém não maior que } 12,7 \text{ mm}$$

c) arruela em domo, não maciça e independente sob a cabeça do parafuso (Figura 9c):

$$d_{we} = d_h + 2t_w + t_1 \leq d_w$$

com d_h , $2t_w$ e t_1 definidos na Figura 9 e $d_{we} \leq 16 \text{ mm}$.

10.5.3.3 Resistência do parafuso à tração

A força de tração resistente de cálculo do parafuso deve ser tomada como:

$$F_{ts,Rd} = F_{ts,Rk} / \gamma$$

onde

$F_{ts,Rk}$ é a força de tração resistente nominal do parafuso, fornecida pelo fabricante ou determinada por ensaio;

γ é o coeficiente de ponderação da resistência, tomado igual a 2,00 ou determinado com base em ensaios conforme seção 11. Nesse caso, deve-se multiplicar o valor calculado de γ por 1,25, não sendo necessário adotar valor superior a 2,00.

10.5.4 Força de cisalhamento e rasgamento do metal base (*pull-over*) combinados

Para parafusos sujeitos à combinação de força de cisalhamento e força de tração, deve ser satisfeita a seguinte expressão de interação:

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{c0,Rd}} + 0,71 \frac{F_{t,Sd}}{F_{t0,Rd}} \leq 1,10$$

onde

$F_{v,Sd}$ é a força de cisalhamento solicitante de cálculo no parafuso;

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

$$F_{c0,Rd} = 2,7 t_1 d f_{u1} / \gamma \quad (\gamma = 1,55)$$

$$F_{t0,Rd} = 1,5 t_1 d_w f_{u1} / \gamma \quad (\gamma = 1,55)$$

Se não houver arruela, considerar $d_w = d_h$.

A expressão de interação é válida desde que sejam atendidos os seguintes limites:

- $0,72 \text{ mm} \leq t_1 \leq 1,13 \text{ mm}$;
- parafusos providos de ponta brocante, com ou sem arruelas, e com diâmetro igual a 5,5 mm ou 6,3 mm;
- $d_w \leq 19 \text{ mm}$;
- $f_{u1} \leq 483 \text{ MPa}$;
- $t_2/t_1 \geq 2,5$.

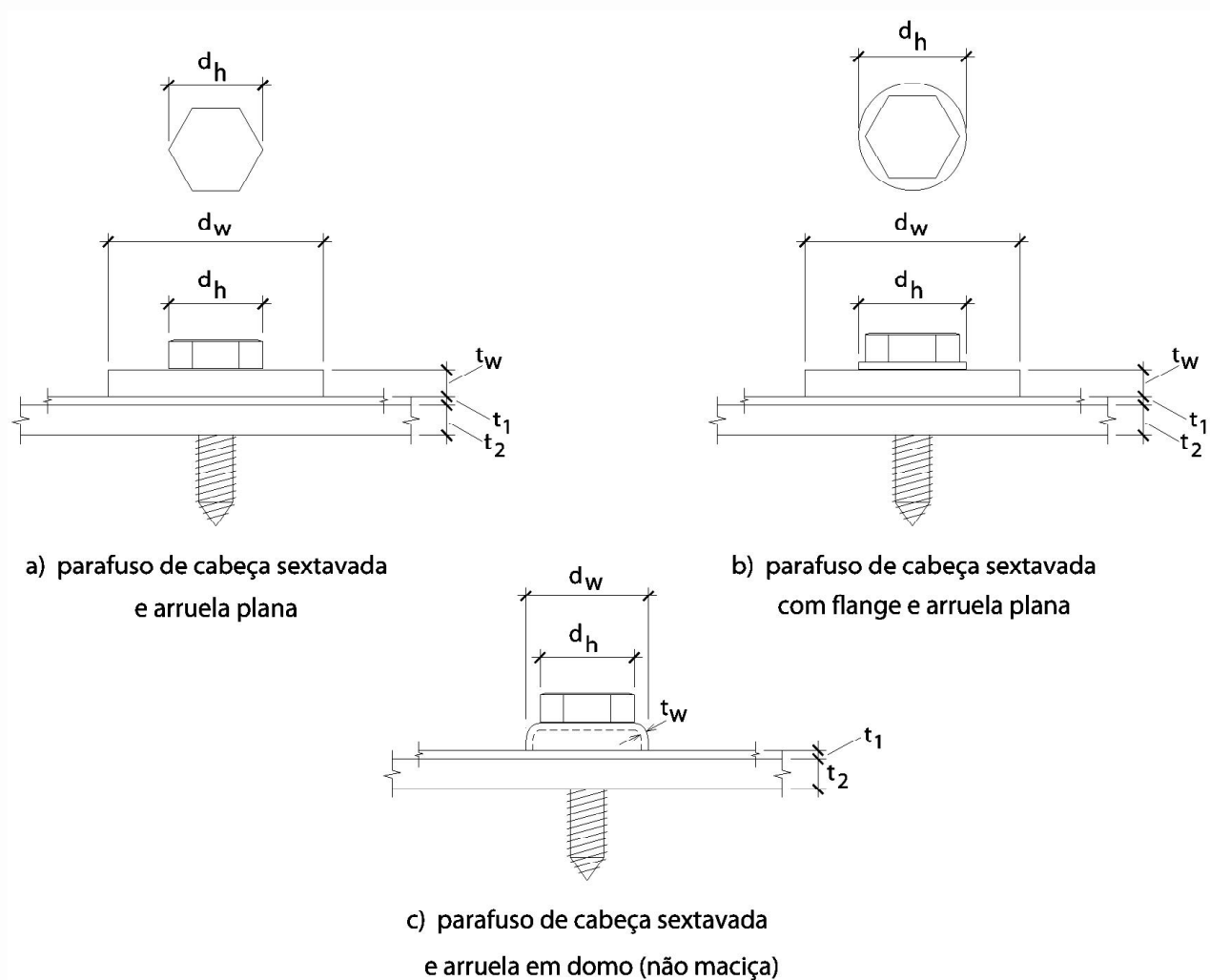


Figura 9 — Dimensões para cálculo da resistência ao rasgamento do metal base (*pull-over*)

10.6 Pressão de contato sobre apoios de concreto

A tensão resistente de cálculo à pressão de contato sobre apoios de concreto deve ser determinada conforme ABNT NBR 8800.

11 Dimensionamento com base em ensaios

11.1 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 9 e 10.

11.2 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.

11.3 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.

11.4 Emissão de relatório

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

- descrição dos protótipos ensaiados, com detalhes e dimensões;
- descrição do aparato de ensaio, com informações detalhadas sobre aplicação do carregamento e vinculação do protótipo;
- descrição dos equipamentos e instrumentos de medição utilizados, constando fabricante, modelo, capacidade, sensibilidade, precisão etc.;
- resultados das medições de todas as etapas de carregamento e descarregamento;
- demaís 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 serviço.

11.5 Análise dos resultados

O valor nominal 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_i 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.

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 valor nominal do esforço resistente e o coeficiente de ponderação da resistência γ dado por:

- vigas com a mesa tracionada conectada a painel e mesa comprimida livre:

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

b) demais casos:

$$\gamma = 1/\left[1,52(X_m X_f) e^{-\beta_0 \sqrt{\delta_m^2 + \delta_f^2 + C_p \delta_t^2 + 0,044}}\right]$$

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 17, o qual corresponde à média da relação entre a propriedade geométrica de interesse calculada com as dimensões da seção transversal medidas nos protótipos e o correspondente valor calculado com as dimensões nominais;

X_m é o valor médio do fator material, conforme Tabela 17, o qual corresponde à média da relação entre a resistência do material dos protótipos, determinada por ensaio, e a resistência nominal especificada;

β_0 é o índice de confiabilidade-alvo, dado por:

$\beta_0 = 1,5$ para vigas com a mesa tracionada conectada a painel e mesa comprimida livre;

$\beta_0 = 2,5$ para barras;

$\beta_0 = 3,5$ 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 17;

δ_m é o coeficiente de variação do fator material, conforme Tabela 17.

Tabela 17 — 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
Barras 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
Casos de barras não relacionados anteriormente	1,00	0,10	1,00	0,05
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:				
- Ruptura do parafuso por cisalhamento	1,10	0,08	1,00	0,05
- Ruptura do parafuso por tração	1,10	0,08	1,00	0,05
- 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 (providos ou não de ponta brocante):				
- Ruptura do parafuso por cisalhamento	1,10	0,10	1,00	0,10
- Ruptura do parafuso por tração	1,10	0,10	1,00	0,10
- Rasgamento entre furos ou entre furo e borda	1,10	0,10	1,00	0,10
- Pressão de contato (esmagamento) e inclinação do parafuso (<i>tilting</i>)	1,10	0,08	1,00	0,05
- Ruptura por tração na seção líquida	1,10	0,10	1,00	0,10
- Arrancamento do parafuso (<i>pull-out</i>) e rasgamento da chapa (<i>pull-over</i>)	1,10	0,10	1,00	0,10
- Cisalhamento e rasgamento da chapa (<i>pull-over</i>) combinados	1,10	0,10	1,00	0,10
Casos de ligações não relacionados anteriormente	1,10	0,10	1,00	0,15

Anexo A (normativo)

Deslocamentos máximos

A.1 Generalidades

Neste Anexo são apresentados os valores dos deslocamentos máximos requeridos para situações usuais nas construções. Esses deslocamentos devem ser entendidos como valores práticos a serem utilizados para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos da estrutura.

A.2 Considerações de projeto

A.2.1 Os valores máximos requeridos para os deslocamentos verticais e horizontais são dados em A.3. Esses valores são empíricos e servem para comparação com os resultados da análise estrutural, feita conforme A.2.2. Em alguns casos, limites mais rigorosos podem ter que ser adotados, considerando, por exemplo, o uso da edificação, as características dos materiais de acabamento, o funcionamento adequado de equipamentos, questões de ordem econômica e a percepção de desconforto.

A.2.2 Os deslocamentos devem ser calculados levando-se em conta a possibilidade de ocorrência de deformações plásticas no estado-limite de serviço. O efeito da rigidez à rotação das ligações, dependendo de avaliação do responsável pelo projeto, pode ter que ser também considerado.

A.2.3 O responsável técnico pelo projeto deve analisar criteriosamente cada situação e decidir se determinado deslocamento pode ser considerado um estado-limite reversível ou não. Na falta de uma melhor avaliação, se um elemento estrutural suportar somente componentes não sujeitos à fissuração e se seu comportamento em serviço for elástico, pode-se considerar o deslocamento excessivo como um estado-limite reversível. Por outro lado, se o elemento estrutural suportar componentes sujeitos à fissuração ou se o seu deslocamento em serviço levar à ocorrência de deformações plásticas, deve-se entender seu deslocamento excessivo como um estado-limite irreversível.

A.2.4 O responsável técnico pelo projeto deve decidir quais combinações de serviço devem ser usadas, conforme o elemento estrutural considerado, as funções previstas para a estrutura, as características dos materiais de acabamento vinculados à estrutura e a sequência de construção, exceto quando houver indicação na Tabela A.1 (ver Notas 4, 5, 6 e 10 desta Tabela). Dependendo dos fatores mencionados, pode ser que se tenha de alterar uma combinação de serviço comumente utilizada. Por exemplo, o deslocamento δ_{\max} (ver A.3.1) está normalmente relacionado à aparência da estrutura, devendo-se usar combinações quase permanentes, conforme 6.7.3. No entanto, nas situações em que esse deslocamento venha a afetar o funcionamento de equipamentos, a causar empoçamentos na cobertura ou mesmo danos permanentes a elementos não estruturais sujeitos à fissuração, como paredes divisórias e forros, colocados antes que as ações consideradas passem a atuar, deve-se então utilizar, no primeiro e segundo casos, combinação frequente e, no terceiro, rara.

A.3 Valores máximos

A.3.1 Os valores máximos para os deslocamentos verticais (flechas) e horizontais são dados na Tabela A.1. No caso dos deslocamentos verticais, tais valores têm como referência uma viga simplesmente apoiada, mostrada na Figura A.1, na qual δ_0 é a contraflecha da viga, δ_1 é o deslocamento devido às ações permanentes, sem efeitos de longa duração, δ_2 é o deslocamento devido aos efeitos de longa duração das ações permanentes (se houver), δ_3 é o deslocamento devido às ações variáveis, incluindo, se houver, os efeitos de longa duração devidos aos

valores quase permanentes dessas ações, δ_{\max} é o deslocamento máximo da viga no estágio final de carregamento levando-se em conta a contraflecha e δ_{tot} é a soma de δ_1 , δ_2 e δ_3 . A consideração dos efeitos de longa duração deve ser feita conforme O.1.2.1 da ABNT NBR 8800:2008.

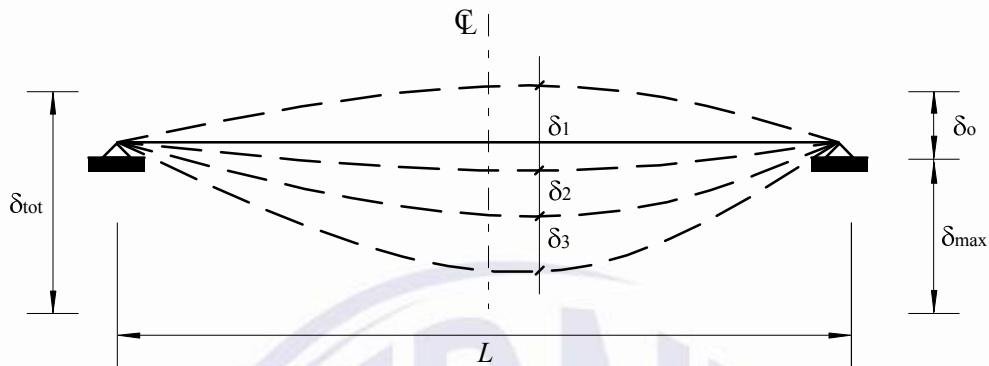


Figura A.1 — Deslocamentos verticais a serem considerados

A.3.2 No cálculo dos deslocamentos verticais a serem comparados com os valores máximos dados na Tabela A.1, pode-se deduzir o valor da contraflecha da viga até o limite do valor da flecha proveniente das ações permanentes (δ_1 da Figura A.1).

A.3.3 Em cada situação, o responsável técnico pelo projeto deve decidir qual(is) deslocamento(s), dado(s) esquematicamente na Figura A.1, deve(m) ser comparado(s) com os valores máximos da Tabela A.1 e quais os carregamentos (ou parte desses) serão considerados no cálculo, levando-se em conta a seqüência de construção. Na maioria das vezes, apenas a parcela do deslocamento devida às ações variáveis δ_3 , somada à parcela (se houver) dos efeitos de longa duração das ações permanentes δ_2 , é responsável por causar danos aos elementos não estruturais. São comuns, entretanto, situações em que se deve somar também o deslocamento de parte das ações permanentes (aquela que passa a atuar somente após a construção do elemento não-estrutural considerado) ou mesmo considerar o deslocamento máximo, δ_{\max} (ver A.2.4). Deve-se também avaliar, em cada situação, a probabilidade de ocorrência simultânea de duas ou mais ações variáveis.

A.3.4 Para galpões em geral e edifícios de um pavimento com paredes de alvenaria, deve ser limitado o deslocamento horizontal (perpendicular à parede) de maneira que a abertura da fissura que possa ocorrer na base da parede não seja superior a 1,5 mm, entendida a parede como painel rígido (Figura A.2).

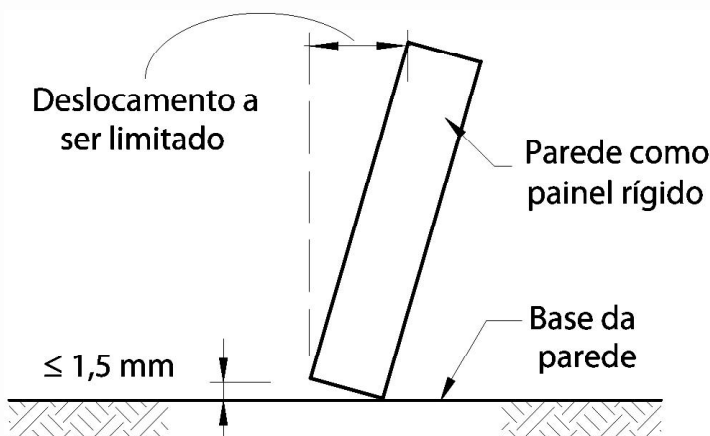


Figura A.2 — Parede como painel rígido

Tabela A.1 — Deslocamentos máximos

Descrição	δ^a
Travessas de fechamento	$L / 180^b$
	$L / 120^{c,d}$
Terças de cobertura ^g	$L / 180^e$
	$L / 120^f$
Vigas de cobertura ^g	$L / 250^h$
Vigas de piso	$L / 350^h$
Vigas que suportam pilares	$L / 500^h$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento: — Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base — Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H / 300$ $H / 400^i$
Edifícios de dois ou mais pavimentos: — Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base — Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$H / 400$ $H / 500^j$
<p>^a 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) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).</p> <p>^b Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso eles existam).</p> <p>^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.</p> <p>^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.</p> <p>^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.</p> <p>^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.</p> <p>^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.</p> <p>^h Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.</p> <p>ⁱ O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.</p> <p>^j Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.</p>	

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} , associada a uma determinada seção transversal, pode ser utilizada no cálculo em substituição à resistência ao escoamento do aço virgem f_y , ficando esta possibilidade restrita às prescrições estabelecidas em 9.6, 9.7, 9.8.1 (incluindo o anexo F) e 9.9. Adicionalmente, as barras submetidas à compressão e as barras submetidas à flexão devem ser constituídas por elementos com $\lambda_p \leq 0,673$ conforme 9.2.2 ou 9.2.3; ou a seção deve apresentar $A_{ef} = A$ na compressão conforme 9.7.2 b) e $W_{ef} = W$ na flexão conforme 9.8.2.1 b).

B.2 Requisitos

As limitações e o procedimento para a determinação de f_{ya} são apresentados em B.2.1 e B.2.2.

B.2.1 Barras submetidas à compressão e barras submetidas à flexão

A resistência ao escoamento modificada f_{ya} deve ser determinada com base em um dos seguintes procedimentos:

- a) ensaios de tração em corpos-de-prova constituídos por segmentos da barra (ensaio na seção completa), conforme B.3;
- b) ensaios de compressão em corpos-de-prova constituídos por segmentos da barra (ensaio na seção completa), conforme B.3;
- c) calculada como indicado a seguir:

$$f_{ya} = C f_{yc} + (1 - C) f_{yf} \leq f_u$$

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 estabelecida por ensaios, conforme B.3e, 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° .

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

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

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.2.2 Barras submetidas à tração

Para barras submetidas à tração, a resistência ao escoamento do aço modificada f_{ya} deve ser determinada por ensaios de tração na seção completa conforme B.3 ou calculada conforme B.2.1 c).

B.3 Ensaios

Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas do aço associadas à seção completa devem atender ao disposto em B.3 a) a B.3 d), onde aplicável. Os ensaios para a determinação da resistência ao escoamento média das partes planas f_{yf} deve atender ao disposto em B.3 e).

- a) quando as propriedades mecânicas do aço forem obtidas por ensaios na seção completa, conforme B.3b a B.3d, pelo menos dois ensaios devem ser feitos por lote de no máximo 50 toneladas de cada perfil, ou pelo menos um ensaio por lote de no máximo 30 toneladas de cada perfil, sendo o lote definido como uma quantidade de aço proveniente de uma mesma corrida de produção.
- b) os ensaios de tração na seção completa devem obedecer aos requisitos da ASTM A370-09a.
- c) os ensaios de compressão na seção completa devem ser conduzidos em corpos-de-prova constituídos por segmentos da barra (*stub-column tests*), conforme AISI S902-02.
- d) para os perfis que serão solicitados predominantemente à flexão, os ensaios de tração ou de compressão na seção completa, conforme B.3.b ou B.3.c, respectivamente, devem ser conduzidos 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 f_{yf} , prevista em B.2, deve 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. 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 (normativo)

Método da resistência direta

C.1 Generalidades

Este Anexo apresenta um método direto para o dimensionamento de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples, aqui simplesmente denominado método da resistência direta (MRD). Esse método substitui o método da largura efetiva e o método da seção efetiva, e as prescrições incluídas neste Anexo podem ser aplicadas em substituição a 9.7 para cálculo de $N_{c,Rd}$, 9.8.2 para cálculo de M_{Rd} e 9.8.5 para cálculo de deslocamentos.

A adoção das prescrições incluídas neste Anexo pressupõe a análise geral de estabilidade elástica da barra. No caso da flambagem global da barra, as fórmulas incluídas nas subseções 9.7.2 e 9.8.2.2 permitem, respectivamente, a obtenção dos valores exatos das forças axiais e momentos fletores de flambagem global elástica, N_e e M_e , respectivamente. Para a obtenção dos valores críticos (valores mínimos) das forças axiais e momentos fletores de flambagem elástica local e distorcional, respectivamente N_l e N_{dist} , M_l e M_{dist} , é necessário o uso de recursos de análise com base na teoria da estabilidade elástica.

Os símbolos e respectivos significados empregados neste Anexo estão apresentados a seguir:

- A é a área bruta da seção transversal da barra;
- N_e é a força axial de flambagem global elástica;
- N_l é a força axial de flambagem local elástica;
- N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica;
- $N_{c,Rk}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente;
- $N_{c,Re}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;
- $N_{c,Rl}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local;
- $N_{c,Rdist}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional;
- $N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo;
- M_e é o momento fletor de flambagem global elástica (flambagem lateral com torção);
- M_l é o momento fletor de flambagem local elástica;
- M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional elástica;
- M_{Rk} é o valor característico do momento fletor resistente;
- M_{Re} é o valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem global;
- M_{Rl} é o valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem local;
- M_{Rdist} é o valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional;

M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo;

$M_{R,ser}$ é o momento fletor resistente calculado substituindo o produto Wf_y por M_n ;

M_n é o momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço conforme 6.7.3;

W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;

λ_t é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional.

C.2 Flambagem elástica local, distorcional e global

As forças axiais de compressão e os momentos fletores de flambagem elástica local, distorcional e global, respectivamente para barras sob compressão centrada, N_t , N_{dist} , N_e ou flexão simples, M_t , M_{dist} , M_e devem ser calculados por meio de análise de estabilidade elástica. No caso da barra não apresentar um dos três modos de flambagem, basta que o cálculo do esforço resistente respectivo não seja levado em consideração.

C.3 Barras submetidas à compressão centrada

O valor característico da força axial de compressão resistente $N_{c,Rk}$ deve ser tomado como o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rt}$, $N_{c,Rdist}$, respectivamente, os quais devem ser calculados conforme C.3.1 a C.3.3. A força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ é dada por $N_{c,Rk} / \gamma$, onde γ é igual a 1,20.

C.3.1 Flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção

$$N_{c,Re} = \left(0,658^{\lambda_0^2}\right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2}\right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5$$

onde

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

C.3.2 Flambagem local

$$N_{c,Rt} = N_{c,Re} \quad \text{para } \lambda_t \leq 0,776$$

$$N_{c,Rt} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_t^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_t^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_t > 0,776$$

onde

$$\lambda_\ell = \left(\frac{N_{c,Re}}{N_\ell} \right)^{0,5}$$

C.3.3 Flambagem distorcional

$$N_{c,Rdist} = Af_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

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

onde

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}} \right)^{0,5}$$

C.4 Barras submetidas à flexão simples

O valor característico do momento fletor resistente M_{Rk} deve ser tomado como o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional, M_{Re} , M_{Rt} , M_{Rdist} , respectivamente, os quais devem ser calculados conforme apresentado em C.4.1 a C.4.3. O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} é dado por M_{Rk} / γ , onde γ é igual a 1,10.

C.4.1 Flambagem lateral com torção

$$M_{Re} = Wf_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 0,6$$

$$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)Wf_y \quad \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$M_{Re} = \frac{Wf_y}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,336$$

onde

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

C.4.2 Flambagem local

$$M_{Rt} = M_{Re} \quad \text{para } \lambda_\ell \leq 0,776$$

$$M_{Rt} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_\ell^{0,8}} \right) \frac{M_{Re}}{\lambda_\ell^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_\ell > 0,776$$

onde

$$\lambda_\ell = \left(\frac{M_{Re}}{M_\ell} \right)^{0,5}$$

C.4.3 Flambagem distorcional

$$M_{Rdist} = Wf_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673$$

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

onde

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Wf_y}{M_{dist}}\right)^{0,5}$$

C.5 Cálculo de deslocamentos

O cálculo de deslocamentos em barras submetidas à flexão deve ser feito considerando um momento de inércia efetivo da seção I_{ef} dado por:

$$I_{ef} = I_g \left(\frac{M_{Rser}}{M_n}\right) \leq I_g$$

onde

M_n é o momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados-limites de serviço, conforme 6.7.3;

M_{Rser} é o momento fletor resistente, calculado conforme C.4, porém substituindo o produto Wf_y por M_n ;

I_g é o momento de inércia da seção bruta.

Anexo D (normativo)

Barras sem enrijecedores transversais sujeitas a forças concentradas

D.1 Este Anexo é aplicável às barras sujeitas a forças concentradas (força aplicada ou reação de apoio) atuando perpendicularmente ao eixo longitudinal da barra, em regiões sem enrijecedores transversais, e causando compressão na alma, portanto susceptíveis a um mecanismo localizado de falha associado ao esmagamento da alma (*web crippling*). Para barras submetidas à flexão, se a relação h/t da alma for maior que 200, devem ser previstos dispositivos que transmitam a força concentrada diretamente para a(s) alma(s).

D.2 A força resistente de cálculo F_{Rd} para uma alma deve ser calculada pela expressão seguinte. Para perfil composto ou perfil com mais de uma alma (perfil cartola), a força resistente de cálculo é a soma das parcelas correspondentes a cada alma:

$$F_{Rd} = \alpha t^2 f_y \sin \theta \left(1 - \alpha_r \sqrt{\frac{r_i}{t}} \right) \left(1 + \alpha_c \sqrt{\frac{c}{t}} \right) \left(1 - \alpha_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) / \gamma \quad (\gamma = 1,35)$$

onde

- α é um coeficiente apresentado nas Tabelas D.1 a D.4, conforme o caso;
- α_r é um coeficiente associado ao raio interno de dobramento, apresentado nas Tabelas D.1 a D.4, conforme o caso;
- α_c é um coeficiente associado ao comprimento de atuação da força concentrada (força aplicada ou reação de apoio), apresentado nas Tabelas D.1 a D.4, conforme o caso;
- α_h é um coeficiente associado à esbeltez da alma, apresentado nas Tabelas D.1 a D.4, conforme o caso;
- θ é o ângulo entre o plano da alma e o plano da superfície de apoio, em graus ($45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$);
- r_i é o raio interno de dobramento;
- c é o comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força concentrada, cujo valor mínimo é igual a 20 mm;
- h é a largura da alma (parte plana da alma);
- t é a espessura da alma.

Tabela D.1 — Coeficientes para cálculo de F_{Rd} em barras compostas (perfis I constituídos por dois perfis U conectados entre si, com $h/t \leq 200$, $c/t \leq 210$, $c/h \leq 1,0$ e $\theta = 90^\circ$)

Condição da mesa		Caso de carregamento ^{b c d}		r/t	α	α_r	α_c	α_h
Conectada ^a	Com enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 5	10,1	0,14	0,28	0,001
			Força interna	≤ 5	23,5	0,17	0,11	0,001
Não conectada	Com enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 5	10,1	0,14	0,28	0,001
			Força interna	≤ 3	23,5	0,17	0,11	0,001
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 3	15,7	0,09	0,08	0,04
			Força interna	≤ 3	36,5	0,14	0,08	0,04
	Sem enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 5	10,1	0,14	0,28	0,001
			Força interna	≤ 3	23,5	0,17	0,11	0,001

^a Corresponde ao caso onde a mesa é conectada na região da força concentrada, junto ao apoio ou ao sistema responsável pela aplicação da força, de modo a impor restrição à rotação da mesa nessa região.

^b Uma mesa carregada corresponde à situação onde a distância livre entre duas forças concentradas adjacentes atuando em mesas opostas (superior e inferior) é igual ou superior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de duas mesas carregadas.

^c Força de extremidade corresponde à situação onde a distância da força concentrada à extremidade da barra é igual ou inferior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de força interna.

^d A Figura D.1 ilustra os casos de carregamento.

Tabela D.2 — Coeficientes para cálculo de F_{Rd} em perfil U simples e perfil U enrijecido (com $h/t \leq 200$, $c/t \leq 210$, $c/h \leq 2,0$ e $\theta = 90^\circ$)

Condição da mesa		Caso de carregamento ^{b c d}		r/t	α	α_r	α_c	α_h
Conectada ^a	Com enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 9	4,6	0,14	0,35	0,02
			Força interna	≤ 5	15,8	0,23	0,14	0,01
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 12	8,6	0,08	0,12	0,048
			Força interna ^e	≤ 12	23	0,10	0,08	0,031
Não conectada	Com enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 5	4,3	0,14	0,35	0,02
			Força interna	≤ 5	15,8	0,23	0,14	0,01
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 3	15,8	0,32	0,05	0,04
			Força interna ^f	≤ 3	25,9	0,52	0,15	0,001
	Sem enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 2	4,6	0,40	0,60	0,03
			Força interna	≤ 1	14,9	0,32	0,10	0,01
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 1	2	0,11	0,37	0,01
			Força interna ^f	≤ 1	14	0,47	0,25	0,04

^a Corresponde ao caso onde a mesa é conectada na região da força concentrada, junto ao apoio ou ao sistema responsável pela aplicação da força, de modo a impor restrição à rotação da mesa nessa região.

^b Uma mesa carregada corresponde à situação onde a distância livre entre duas forças concentradas adjacentes atuando em mesas opostas (superior e inferior) é igual ou superior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de duas mesas carregadas.

^c Força de extremidade corresponde à situação onde a distância da força concentrada à extremidade da barra é igual ou inferior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de força interna.

^d A Figura D.1 ilustra os casos de carregamento.

^e A distância da força concentrada à extremidade da barra deve ser superior a $2,5 h$.

^f A distância da força concentrada à extremidade da barra deve ser superior a $1,5 h$.

Tabela D.3 — Coeficientes para cálculo de F_{Rd} em perfil Z (com $h/t \leq 200$, $c/t \leq 210$, $c/h \leq 2,0$ e $\theta = 90^\circ$)

Condição da mesa		Caso de carregamento ^{b c d}		r/t	α	α_r	α_c	α_h
Conectada ^a	Com enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 9	4,6	0,14	0,35	0,02
			Força interna	$\leq 5,5$	15,8	0,23	0,14	0,01
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 12	10,3	0,05	0,16	0,052
			Força interna ^e	≤ 12	25,9	0,07	0,07	0,04
Não conectada	Com enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 5	5,7	0,09	0,02	0,001
			Força interna	≤ 5	15,8	0,23	0,14	0,01
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 3	15,8	0,32	0,05	0,04
			Força interna ^f	≤ 3	25,9	0,52	0,15	0,001
	Sem enrijecedor de borda	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 2	4,6	0,40	0,60	0,03
			Força interna	≤ 1	14,9	0,32	0,10	0,01
		Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 1	2	0,11	0,37	0,01
			Força interna ^f	≤ 1	14	0,47	0,25	0,04

^a Corresponde ao caso onde a mesa é conectada na região da força concentrada, junto ao apoio ou ao sistema responsável pela aplicação da força, de modo a impor restrição à rotação da mesa nessa região.

^b Uma mesa carregada corresponde à situação onde a distância livre entre duas forças concentradas adjacentes atuando em mesas opostas (superior e inferior) é igual ou superior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de duas mesas carregadas.

^c Força de extremidade corresponde à situação onde a distância da força concentrada à extremidade da barra é igual ou inferior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de força interna.

^d A Figura D.1 ilustra os casos de carregamento.

^e A distância da força concentrada à extremidade da barra deve ser superior a $2,5 h$.

^f A distância da força concentrada à extremidade da barra deve ser superior a $1,5 h$.

Tabela D.4 — Coeficientes para cálculo de F_{Rd} em perfil cartola (com $h/t \leq 200$, $c/t \leq 200$, $c/h \leq 2,0$ e $\theta = 90^\circ$)

Condição da mesa	Caso de carregamento ^{b c d}		r/t	α	α_r	α_c	α_h
Conectada ^a	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 5	4	0,25	0,68	0,04
		Força interna	≤ 10	19,5	0,13	0,13	0,04
	Duas mesas carregadas	Força de extremidade	≤ 10	10,3	0,10	0,07	0,03
		Força interna	≤ 10	11,5	0,14	0,22	0,02
Não conectada	Uma mesa carregada	Força de extremidade	≤ 4	4	0,25	0,68	0,04
		Força interna	≤ 4	19,5	0,13	0,13	0,04

^a Corresponde ao caso onde a mesa é conectada na região da força concentrada, junto ao apoio ou ao sistema responsável pela aplicação da força, de modo a impor restrição à rotação da mesa nessa região.

^b Uma mesa carregada corresponde à situação onde a distância livre entre duas forças concentradas adjacentes atuando em mesas opostas (superior e inferior) é igual ou superior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de duas mesas carregadas.

^c Força de extremidade corresponde à situação onde a distância da força concentrada à extremidade da barra é igual ou inferior a $1,5 h$. Caso contrário, fica caracterizado o caso de força interna.

^d A Figura D.1 ilustra os casos de carregamento.

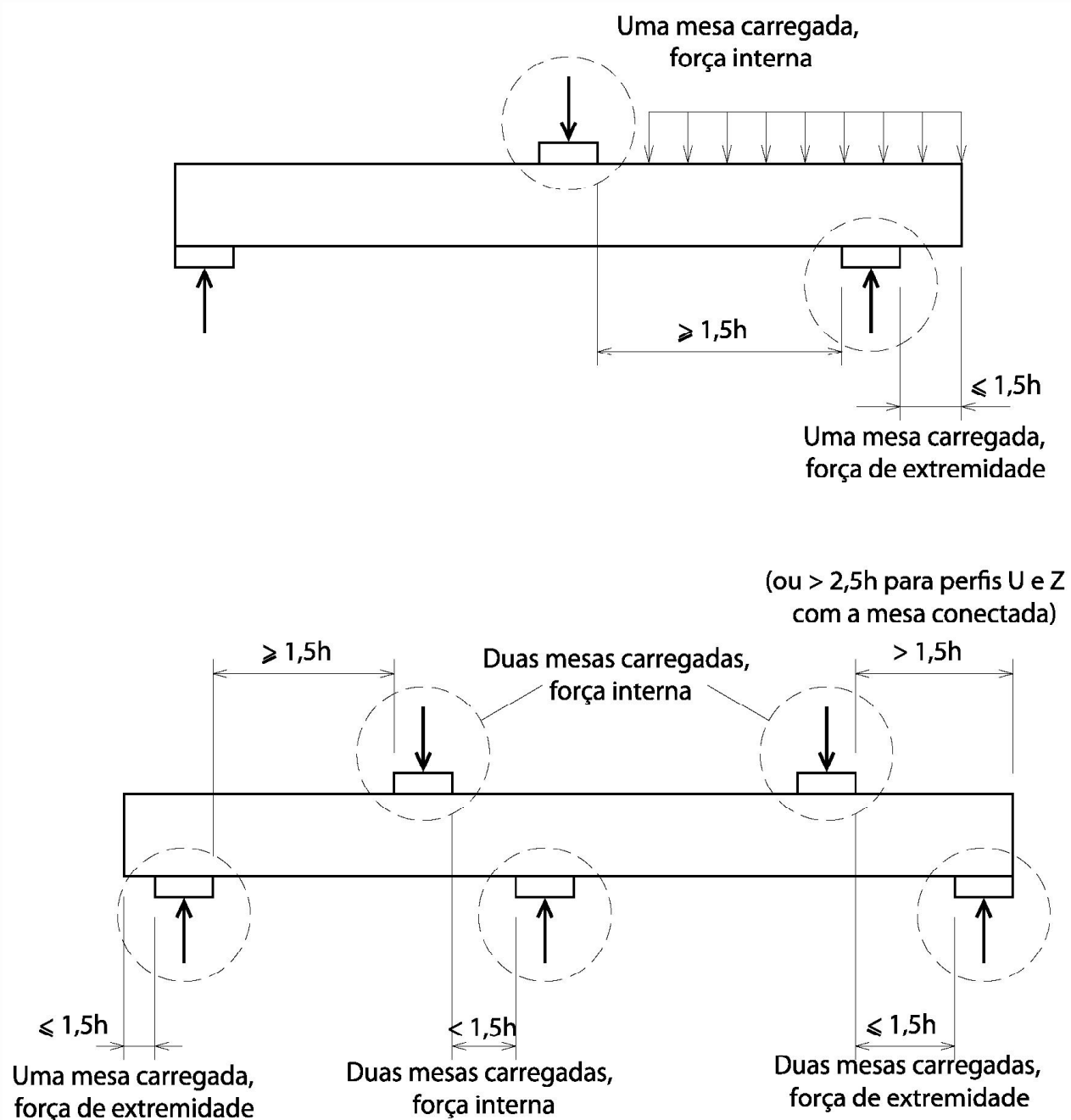


Figura D.1 — Ilustração dos casos de carregamento

Anexo E (normativo)

Momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria

E.1 Este Anexo apresenta a formulação para o cálculo do momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria. Para efeito deste Anexo, o eixo x é o eixo de simetria, orientado de tal forma que a coordenada do centro de torção seja negativa. Na formulação apresentada em E.2.1, as grandezas x_m e x_0 devem sempre ser consideradas com sinal positivo.

E.2 O momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para barras com seção monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo perpendicular ao eixo de simetria, isto é, flexão em torno do eixo y , é dado por:

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

onde

$C_s = +1$ se o momento fletor causar compressão na parte da seção com coordenada x negativa, ou seja, do mesmo lado que o centro de torção;

$C_s = -1$ se o momento causar tração na parte da seção com coordenada x negativa, ou seja, do mesmo lado que o centro de torção;

N_{ex} , N_{ez} e r_0 são conforme 9.7.2.1 e 9.8.2.2;

j é um parâmetro da seção transversal conforme E.2.1;

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

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. Se o momento fletor em qualquer seção intermediária for superior a M_2 , deve ser adotado C_m igual a 1,0.

E.2.1 O parâmetro j deve ser calculado por:

$$j = \frac{1}{2I_y} \left[\int_A x^3 dA + \int_A xy^2 dA \right] + x_0$$

onde

I_y é o momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal y ;

x_0 é a distância do centro de torção ao centróide, na direção do eixo x , dada em E.2.1.2 (ver Figura E.1).

Alternativamente, para seções U simples, U enrijecido e cartola, pode ser empregada a seguinte expressão:

$$j = \frac{1}{2I_y} (\beta_w + \beta_f + \beta_\ell) + x_0$$

onde

β_w e β_f são parâmetros da seção referentes à alma e à mesa, respectivamente, conforme E.2.1.1;

β_ℓ é um parâmetro da seção referente ao enrijecedor de borda, conforme E.2.1.2.

E.2.1.1 Os parâmetros β_w e β_f são dados por:

$$\beta_w = - \left[\frac{tx_m a_m^3}{12} + tx_m^3 a_m \right]$$

$$\beta_f = \frac{t}{2} \left[(b_m - x_m)^4 - x_m^4 \right] + \frac{ta_m^2}{4} \left[(b_m - x_m)^2 - x_m^2 \right]$$

onde

a_m e b_m são larguras referentes à linha média da seção, conforme Figura E.1;

t é a espessura;

x_m é distância do centróide em relação à linha média da alma, na direção do eixo x, dada em E.2.1.2 (ver Figura E.1).

E.2.1.2 O parâmetro β_ℓ e as distâncias x_m e x_0 são dados por:

a) para seção U simples

$$\beta_\ell = 0$$

$$x_m = \frac{b_m^2}{a_m + 2b_m}$$

$$x_0 = b_m \left(\frac{3a_m^2 b_m}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m} \right) + x_m$$

b) para seção U enrijecido

$$\beta_\ell = 2c_m t (b_m - x_m)^3 + \frac{2}{3} t (b_m - x_m) \left[\left(\frac{a_m}{2} \right)^3 - \left(\frac{a_m}{2} - c_m \right)^3 \right]$$

$$x_m = \frac{b_m (b_m + 2c_m)}{a_m + 2b_m + 2c_m}$$

$$x_0 = b_m \left[\frac{3a_m^2 b_m + c_m (6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m (8c_m^2 - 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_m$$

c) para seção cartola

$$\beta_t = 2c_m t (b_m - x_m)^3 + \frac{2}{3} t (b_m - x_m) \left[\left(\frac{a_m}{2} + c_m \right)^3 - \left(\frac{a_m}{2} \right)^3 \right]$$

$$x_m = \frac{b_m (b_m + 2c_m)}{a_m + 2b_m + 2c_m}$$

$$x_0 = b_m \left[\frac{3a_m^2 b_m + c_m (6a_m^2 - 8c_m^2)}{a_m^3 + 6a_m^2 b_m + c_m (8c_m^2 + 12a_m c_m + 6a_m^2)} \right] + x_m$$

onde:

c_m é a largura do enrijecedor de borda referente à linha média da seção, conforme Figura E.1.

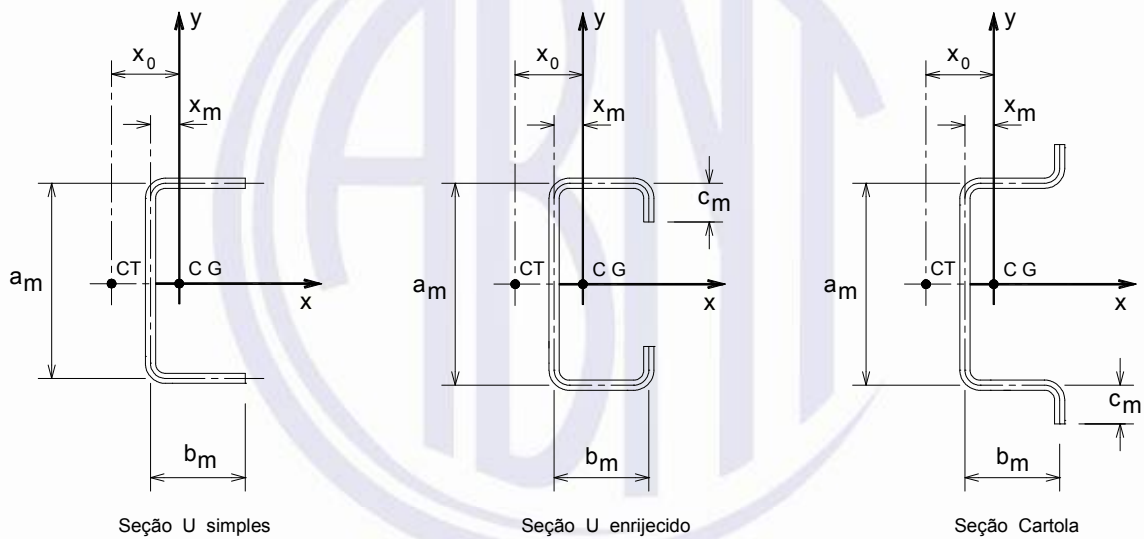


Figura E.1 — Indicação das dimensões, distâncias e eixos da seção

Anexo F (normativo)

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:

$$M_{Rd} = RW_{ef}f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10)$$

onde

W_{ef} conforme definido em 9.8.2.1;

R é um fator de redução, conforme Tabela F.1.

O emprego dos valores do fator de redução R indicados na Tabela F.1 é permitido, desde que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- a) mesas com enrijecedor de borda;
- b) $b_w \leq 292$ mm;
- c) $60 \leq b_w/t \leq 170$;
- d) $2,8 \leq b_w/b_f \leq 4,5$;
- e) $16 \leq b/t \leq 43$ (b é a largura da parte plana da mesa);
- f) 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 $1,5 b_w$;
- g) vão inferior a 10 m;
- h) deslocamento lateral de ambas as mesas impedido nos apoios;
- i) 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;
- j) tipos de conectores: no mínimo parafusos auto-atarraxantes, providos ou não de ponta brocante, com diâmetro nominal 5,5 mm (parafuso nº 12) ou rebites com diâmetro nominal 4,75 mm, e arruelas com diâmetro nominal 12,5 mm;
- k) conectores não padronizados não devem ser utilizados;
- l) espaçamento máximo entre centro de conectores não maior que 300 mm, e posicionados próximos ao centro da mesa da viga;
- m) a resistência ao escoamento empregada no cálculo não deve exceder 410 MPa.

Tabela F.1 — Valores do fator de redução R para seções com mesas com enrijecedor de borda

Barras biapoiadas		
Largura nominal da alma b_w (mm)	Seção	R
$b_w \leq 165$	U ou Z	0,70
$165 < b_w \leq 216$	U ou Z	0,65
$216 < b_w \leq 292$	Z	0,50
$216 < b_w \leq 292$	U	0,40
Barras contínuas ^a		
Largura nominal da alma b_w (mm)	Seção	R
$b_w \leq 292$	U	0,60
$b_w \leq 292$	Z	0,70
^a Se a relação entre vãos adjacentes superar 1,2, devem ser considerados os valores de R para barras biapoiadas.		

F.2 Se uma ou mais condições estabelecidas anteriormente não forem satisfeitas, o dimensionamento pode ser feito com base em ensaios, conforme a Seção 11, ou com base em modelos semi-empíricos.

F.3 Em qualquer caso é permitido o dimensionamento com base em ensaios, conforme a Seção 11, ou com base em modelos semi-empíricos, como alternativa ao procedimento proposto neste anexo.

F.4 Este Anexo não é aplicável aos trechos em balanço, e 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 9.8.2, ou com base em ensaios, conforme a Seção 11.

Anexo G (normativo)

Vigas mistas de aço e concreto

G.1 O dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto constituídas por um componente de aço formado a frio, simétrico em relação ao plano de flexão, que pode ser um perfil I ou perfil caixão, ambos compostos por dois perfis U simples ou enrijecidos, com uma laje de concreto acima de sua face superior ligada ao componente de aço por meio de conectores de cisalhamento, pode ser feito com base na ABNT NBR 8800, no que for aplicável, e ainda considerando as seguintes condições:

- a) para momento fletor positivo, a verificação deve ser feita admitindo distribuição elástica de tensões (processo elástico), com base nas propriedades da seção mista homogeneizada, e a alma da viga de aço deve apresentar largura efetiva igual à própria largura ($b_{ef} = b$), calculada conforme 9.2.2 para o estado-limite último de início de escoamento da seção da viga de aço isolada;
- b) para momento fletor negativo, a verificação deve ser feita com base no componente de aço isolado, conforme 9.8.2. Alternativamente, pode ser considerada a contribuição da armadura contida na largura efetiva da laje de concreto. Nesse caso, deve-se admitir distribuição elástica de tensões (processo elástico) sendo que a alma e a mesa comprimida devem apresentar largura efetiva igual à própria largura ($b_{ef} = b$), calculada conforme 9.2.2 ou 9.2.3 para o estado-limite último de início de escoamento da seção formada pela viga de aço e armadura. Adicionalmente, para perfil U enrijecido, o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional λ_{dist} , admitindo a viga de aço sob compressão uniforme, deve resultar igual ou inferior a 0,561, sendo λ_{dist} calculado conforme 9.7.3.
- c) são previstos conectores de cisalhamento em perfil U laminado ou perfil U formado a frio com espessura igual ou superior a 3,0 mm. Outros conectores podem ser empregados desde que apresentem compatibilidade construtiva com a viga de aço a qual serão fixados. Nesse caso, sua força resistente e ductilidade devem ser determinadas com base em ensaios conforme EN 1994-1-1.

G.2 Em qualquer caso é permitido o dimensionamento com base em ensaios, conforme a seção 11, como alternativa ao procedimento proposto neste Anexo.