

Norma Portuguesa

NP
EN 1993-1-1
2010

Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço **Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios**

Eurocode 3 – Calcul des structures en acier
Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments

Eurocode 3 – Design of steel structures
Part 1-1: General rules and rules for buildings

ICS
91.010.30; 93.010

DESCRIPTOR
Materiais de construção; construção civil; estruturas; cálculos matemáticos; altura; sistemas de classificação; inclinado; eurocódigo; medição da carga; neve

CORRESPONDÊNCIA
Versão portuguesa da EN 1993-1-1:2005 + AC:2009

HOMOLOGAÇÃO
Termo de Homologação n.º 62/2010, de 2010-03-12
A presente Norma resulta da revisão da
NP ENV 1993-1-1:1998

ELABORAÇÃO
CT 115 (LNEC)

EDIÇÃO
Março de 2010

CÓDIGO DE PREÇO
XEC029

© IPQ reprodução proibida

Instituto Português da  Qualidade

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA PORTUGAL

Tel. + 351-212 948 100 Fax + 351-212 948 101
E-mail: ipq@mail.ipq.pt Internet: www.ipq.pt

Preâmbulo nacional

À Norma Europeia EN 1993-1-3:2005, foi dado estatuto de Norma Portuguesa em 2005-08-16 (Termo de Adopção nº 1157/2005, de 2005-08-16).

A presente Norma substitui a NP ENV 1993-1-1:1998 e constitui a versão portuguesa da EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, a qual faz parte de um conjunto de normas integrantes do Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço.

Esta Norma constitui a Parte 1-1 do Eurocódigo 3 e diz respeito às regras gerais a adoptar no projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil de aço. Nas restantes Partes do mesmo Eurocódigo são tratadas as regras complementares a adoptar no projecto de certos tipos de estruturas, na utilização de determinados materiais e na verificação da segurança em situações particulares, bem como na verificação da resistência ao fogo das estruturas de aço.

A aplicação desta Norma em Portugal deve obedecer às disposições constantes do respectivo Anexo Nacional NA, que dela faz parte integrante. Neste Anexo são nomeadamente concretizadas as prescrições explicitamente deixadas em aberto no corpo do Eurocódigo para escolha nacional, denominadas Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP).

NORMA EUROPEIA

EN 1993-1-1

EUROPÄISCHE NORM

Maio 2005

NORME EUROPÉENNE

+ AC

EUROPEAN STANDARD

Abril 2009

ICS: 91.010.30; 91.080.10

Substitui a ENV 1993-1-1:1992

Versão portuguesa

Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço
Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios

Eurocode 3 – Bemessung und
Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1-1: Allgemeine
Bemessungsregeln und Regeln
für den Hochbau

Eurocode 3 – Calcul des
structures en acier
Partie 1-1: Règles générales et
règles pour les bâtiments

Eurocode 3 – Design of steel
structures
Part 1-1: General rules and
rules for buildings

A presente Norma é a versão portuguesa da Norma Europeia EN 1993-1-1:2005 + AC:2009 e tem o mesmo estatuto que as versões oficiais. A tradução é da responsabilidade do Instituto Português da Qualidade. Esta Norma Europeia e a sua Errata foram ratificadas pelo CEN em 2004-04-16 e 2009-04-15, respectivamente.

Os membros do CEN são obrigados a submeter-se ao Regulamento Interno do CEN/CENELEC que define as condições de adopção desta Norma Europeia, como norma nacional, sem qualquer modificação.

Podem ser obtidas listas actualizadas e referências bibliográficas relativas às normas nacionais correspondentes junto do Secretariado Central ou de qualquer dos membros do CEN.

A presente Norma Europeia existe nas três versões oficiais (alemão, francês e inglês). Uma versão noutra língua, obtida pela tradução, sob responsabilidade de um membro do CEN, para a sua língua nacional, e notificada ao Secretariado Central, tem o mesmo estatuto que as versões oficiais.

Os membros do CEN são os organismos nacionais de normalização dos seguintes países: Alemanha, Áustria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Letónia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia e Suíça.

CEN

Comité Européen de Normalização
Europäisches Komitee für Normung
Comité Européen de Normalisation
European Committee for Standardization

Secretariado Central: Avenue Marnix 17, B-1000 Bruxelas

Sumário	Página
Preâmbulo nacional.....	2
Preâmbulo	9
Antecedentes do programa dos Eurocódigos.....	9
Estatuto e campo de aplicação dos Eurocódigos	10
Normas nacionais de implementação dos Eurocódigos.....	11
Ligações entre os Eurocódigos e as especificações técnicas harmonizadas (EN e ETA) relativas aos produtos.....	11
Informações adicionais específicas da EN 1993-1	11
Anexo Nacional da EN 1993-1-1	12
1 Generalidades.....	13
1.1 Objectivo e campo de aplicação	13
1.1.1 Objectivo e campo de aplicação do Eurocódigo 3.....	13
1.1.2 Objectivo e campo de aplicação da Parte 1-1 do Eurocódigo 3	14
1.2 Referências normativas.....	14
1.2.1 Normas gerais de referência	14
1.2.2 Normas de referência relativas a aço de construção soldável.....	14
1.3 Pressupostos.....	15
1.4 Distinção entre Princípios e Regras de Aplicação	15
1.5 Termos e definições.....	15
1.6 Símbolos	16
1.7 Convenções para os eixos dos elementos	26
2 Bases para o projecto	28
2.1 Requisitos	28
2.1.1 Requisitos gerais.....	28
2.1.2 Gestão da fiabilidade	28
2.1.3 Tempo de vida útil de projecto, durabilidade e robustez.....	28
2.2 Princípios para a verificação da segurança em relação aos estados limites.....	29
2.3 Variáveis básicas	29
2.3.1 Acções e influências ambientais.....	29
2.3.2 Propriedades dos materiais e dos produtos.....	29
2.4 Verificação pelo método dos coeficientes parciais.....	30
2.4.1 Valores de cálculo das propriedades dos materiais	30
2.4.2 Valores de cálculo das grandezas geométricas	30

2.4.3 Valores de cálculo da resistência.....	30
2.4.4 Verificação do equilíbrio estático (EQU).....	30
2.5 Projecto com apoio experimental	30
3 Materiais	31
3.1 Generalidades	31
3.2 Aço estrutural	31
3.2.1 Propriedades dos materiais.....	31
3.2.2 Requisitos de ductilidade.....	31
3.2.3 Resistência à rotura frágil (Tenacidade).....	33
3.2.4 Propriedades segundo a espessura.....	34
3.2.5 Tolerâncias	34
3.2.6 Valores de cálculo das propriedades dos materiais	34
3.3 Dispositivos de ligação.....	35
3.3.1 Elementos de ligação.....	35
3.3.2 Consumíveis para soldadura.....	35
3.4 Outros produtos prefabricados utilizados em edifícios	35
4 Durabilidade	35
5 Análise estrutural	35
5.1 Modelação estrutural para a análise	35
5.1.1 Modelação estrutural e hipóteses fundamentais	35
5.1.2 Modelação das ligações.....	36
5.1.3 Interacção terreno-estrutura.....	36
5.2 Análise global.....	36
5.2.1 Efeitos da configuração deformada da estrutura	36
5.2.2 Estabilidade estrutural de pórticos.....	38
5.3 Imperfeições	39
5.3.1 Bases.....	39
5.3.2 Imperfeições para a análise global de pórticos.....	40
5.3.3 Imperfeições para a análise dos sistemas de contraventamento	44
5.3.4 Imperfeições dos elementos	46
5.4 Métodos de análise considerando o comportamento não linear dos materiais	46
5.4.1 Generalidades	46
5.4.2 Análise global elástica.....	47
5.4.3 Análise global plástica.....	47

5.5 Classificação das secções transversais.....	48
5.5.1 Bases.....	48
5.5.2 Classificação.....	48
5.6 Requisitos das secções transversais para uma análise global plástica.....	49
6 Estados limites últimos.....	54
6.1 Generalidades.....	54
6.2 Resistência das secções transversais.....	54
6.2.1 Generalidades.....	54
6.2.2 Propriedades das secções.....	55
6.2.3 Tração.....	58
6.2.4 Compressão.....	58
6.2.5 Momento flector.....	59
6.2.6 Esforço transversal.....	60
6.2.7 Torção.....	62
6.2.8 Flexão com esforço transversal.....	63
6.2.9 Flexão composta.....	64
6.2.10 Flexão composta com esforço transversal.....	66
6.3 Resistência dos elementos à encurvadura.....	67
6.3.1 Elementos uniformes comprimidos.....	67
6.3.2 Elementos uniformes em flexão.....	71
6.3.3 Elementos uniformes em flexão composta com compressão.....	76
6.3.4 Método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais.....	77
6.3.5 Encurvadura lateral de elementos com rótulas plásticas.....	78
6.4 Elementos compostos uniformes solicitados à compressão.....	80
6.4.1 Generalidades.....	80
6.4.2 Elementos comprimidos de uma estrutura triangulada.....	83
6.4.3 Elementos comprimidos associados por travessas.....	86
6.4.4 Elementos compostos com cordas pouco afastadas.....	87
7 Estados limites de utilização.....	88
7.1 Generalidades.....	88
7.2 Estados limites de utilização para os edifícios.....	89
7.2.1 Deslocamentos verticais.....	89
7.2.2 Deslocamentos horizontais.....	89
7.2.3 Efeitos dinâmicos.....	89

Anexo A (informativo) Método 1: Factores de interacção kij para a expressão de interacção indicada em 6.3.3(4).....	90
Anexo B (informativo) Método 2: Factores de interacção kij para a expressão de interacção indicada em 6.3.3(4).....	93
Anexo AB (informativo) Disposições de projecto adicionais	96
AB.1 Análise estrutural tomando em consideração a não linearidade material	96
AB.2 Disposições simplificadas para o projecto de vigas de pavimento contínuas	96
Anexo BB (informativo) Encurvadura de componentes de estruturas de edifícios.....	97
BB.1 Encurvadura por flexão de elementos de estruturas trianguladas e treliçadas	97
BB.1.1 Generalidades.....	97
BB.1.2 Cantoneiras utilizadas como elementos de alma.....	97
BB.1.3 Elementos com secção tubular	98
BB.2 Travamentos contínuos	98
BB.2.1 Travamentos laterais contínuos.....	98
BB.2.2 Travamentos à torção contínuos.....	98
BB.3 Comprimentos estáveis, em relação à encurvadura fora do plano, de troços de elementos contendo rótulas plásticas.....	100
BB.3.1 Elementos uniformes constituídos por perfis laminados ou por perfis soldados em I de dimensões equivalentes	100
BB.3.2 Elementos laminados ou soldados equivalentes de secção em I com esquadro de reforço ou secção variável	104
BB.3.3 Coeficientes de correcção para diagramas de momentos flectores variáveis que actuam em elementos travados lateralmente ao longo do banzo traccionado.....	106
Anexo Nacional NA	109
Introdução.....	109
NA.1 – Objectivo e campo de aplicação.....	109
NA.2 – Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP)	109
NA.2.1 – Generalidades	109
NA.2.2 – Princípios e Regras de Aplicação sem prescrições a nível nacional.....	109
NA.2.3 – Princípios e Regras de Aplicação com prescrições a nível nacional	110
NA.3 – Utilização dos Anexos informativos	113
NA.4 – Informações complementares.....	114
NA.4.1 – Objectivo	114
NA.4.2 – Informações gerais.....	114
NA.4.3 – Informações específicas.....	114

NP
EN 1993-1-1
2010

p. 8 de 116

NA.5 – Correspondência entre as normas europeias referidas na presente Norma e as normas nacionais	114
---	------------

Preâmbulo

A presente Norma foi elaborada pelo Comité Técnico CEN/TC 250 "*Structural Eurocodes*", cujo secretariado é assegurado pela BSI. O CEN/TC 250 é responsável por todos os Eurocódigos Estruturais.

A esta Norma Europeia deve ser atribuído o estatuto de Norma Nacional, seja por publicação de um texto idêntico, seja por adopção, o mais tardar em Novembro de 2005, e as normas nacionais divergentes devem ser anuladas o mais tardar em Março de 2010.

A presente Norma substitui a ENV 1993-1-1.

De acordo com o Regulamento Interno do CEN/CENELEC, a presente Norma Europeia deve ser implementada pelos organismos nacionais de normalização dos seguintes países: Alemanha, Áustria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Letónia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia e Suíça.

Antecedentes do programa dos Eurocódigos

Em 1975, a Comissão da Comunidade Europeia optou por um programa de acção na área da construção, baseado no artigo 95º do Tratado. O objectivo do programa era a eliminação de entraves técnicos ao comércio e a harmonização das especificações técnicas.

No âmbito deste programa de acção, a Comissão tomou a iniciativa de elaborar um conjunto de regras técnicas harmonizadas para o projecto de obras de construção, as quais, numa primeira fase, serviriam como alternativa para as regras nacionais em vigor nos Estados-Membros e que, posteriormente, as substituiriam.

Durante quinze anos, a Comissão, com a ajuda de uma Comissão Directiva com representantes dos Estados-Membros, orientou o desenvolvimento do programa dos Eurocódigos, que conduziu à primeira geração de regulamentos europeus na década de 80.

Em 1989, a Comissão e os Estados-Membros da UE e da EFTA decidiram, com base num acordo¹⁾ entre a Comissão e o CEN, transferir, através de uma série de mandatos, a preparação e a publicação dos Eurocódigos para o CEN, tendo em vista conferir-lhes no futuro a categoria de Norma Europeia (EN). Tal, liga, *de facto*, os Eurocódigos às disposições de todas as directivas do Conselho e/ou decisões da Comissão em matéria de normas europeias (por exemplo, a Directiva 89/106/CEE do Conselho relativa a produtos de construção – DPC – e as Directivas 93/37/CEE, 92/50/CEE e 89/440/CEE do Conselho relativas a obras públicas e serviços, assim como as Directivas da EFTA equivalentes destinadas à instituição do mercado interno).

O programa relativo aos Eurocódigos Estruturais inclui as seguintes normas, cada uma das quais é, geralmente, constituída por diversas Partes:

EN 1990 Eurocódigo: Bases para o projecto de estruturas

EN 1991 Eurocódigo 1: Acções em estruturas

EN 1992 Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão

EN 1993 Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço

EN 1994 Eurocódigo 4: Projecto de estruturas mistas aço-betão

¹⁾ Acordo entre a Comissão das Comunidades Europeias e o Comité Europeu de Normalização (CEN) relativo ao trabalho sobre os Eurocódigos para o projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil (BC/CEN/03/89).

EN 1995 Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira

EN 1996 Eurocódigo 6: Projecto de estruturas de alvenaria

EN 1997 Eurocódigo 7: Projecto geotécnico

EN 1998 Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos

EN 1999 Eurocódigo 9: Projecto de estruturas de alumínio

Os Eurocódigos reconhecem a responsabilidade das autoridades regulamentadoras de cada Estado-Membro e salvaguardaram o seu direito de estabelecer os valores relacionados com questões de regulamentação da segurança, a nível nacional, nos casos em que estas continuem a variar de Estado para Estado.

Estatuto e campo de aplicação dos Eurocódigos

Os Estados-Membros da UE e da EFTA reconhecem que os Eurocódigos servem de documentos de referência para os seguintes efeitos:

- como meio de comprovar a conformidade dos edifícios e de outras obras de engenharia civil com as exigências essenciais da Directiva 89/106/CEE do Conselho, particularmente a Exigência Essencial n.º 1 – Resistência mecânica e estabilidade – e a Exigência Essencial n.º 2 – Segurança contra incêndio;
- como base para a especificação de contratos de trabalhos de construção e de serviços de engenharia a eles associados;
- como base para a elaboração de especificações técnicas harmonizadas para os produtos de construção (EN e ETA).

Os Eurocódigos, dado que dizem respeito às obras de construção, têm uma relação directa com os documentos interpretativos²⁾ referidos no artigo 12º da DPC, embora sejam de natureza diferente das normas harmonizadas relativas aos produtos³⁾. Por conseguinte, os aspectos técnicos decorrentes dos Eurocódigos devem ser considerados de forma adequada pelos Comités Técnicos do CEN e/ou pelos Grupos de Trabalho da EOTA envolvidos na elaboração das normas relativas aos produtos, tendo em vista a obtenção de uma compatibilidade total destas especificações técnicas com os Eurocódigos.

Os Eurocódigos fornecem regras comuns de cálculo estrutural para a aplicação corrente no projecto de estruturas e dos seus componentes, de natureza quer tradicional quer inovadora. Elementos construtivos ou condições de cálculo não usuais não são especificamente incluídos, devendo o projectista, nestes casos, assegurar o apoio especializado necessário.

²⁾ De acordo com o n.º 3 do artigo 3º da DPC, as exigências essenciais (EE) traduzir-se-ão em documentos interpretativos que estabelecem as ligações necessárias entre as exigências essenciais e os mandatos para a elaboração de normas europeias (EN) harmonizadas e guias de aprovação técnica europeia (ETAG), e das próprias aprovações técnicas europeias (ETA).

³⁾ De acordo com o artigo 12º da DPC, os documentos interpretativos devem:

- a) concretizar as exigências essenciais harmonizando a terminologia e as bases técnicas e indicando, sempre que necessário, classes ou níveis para cada exigência;
 - b) indicar métodos de correlação entre essas classes ou níveis de exigências e as especificações técnicas, por exemplo, métodos de cálculo e de ensaio, regras técnicas de concepção de projectos, etc.;
 - c) servir de referência para o estabelecimento de normas europeias harmonizadas e de guias de aprovação técnica europeia.
- Os Eurocódigos, de facto, desempenham um papel semelhante na área da EE 1 e de uma parte da EE 2.

Normas nacionais de implementação dos Eurocódigos

As normas nacionais de implementação dos Eurocódigos incluirão o texto completo do Eurocódigo (incluindo anexos), conforme publicado pelo CEN, o qual poderá ser precedido de uma página de título e de um preâmbulo nacionais, e ser também seguido de um Anexo Nacional.

O Anexo Nacional só poderá conter informações sobre os parâmetros deixados em aberto no Eurocódigo para escolha nacional, designados por Parâmetros Determinados a nível Nacional, a utilizar no projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil no país em questão, nomeadamente:

- valores dos coeficientes parciais e/ou classes, nos casos em que são apresentadas alternativas no Eurocódigo;
- valores para serem utilizados nos casos em que apenas um símbolo é apresentado no Eurocódigo;
- dados específicos do país (geográficos, climáticos, etc), por exemplo, mapa de zonamento da neve;
- o procedimento a utilizar nos casos em que sejam apresentados procedimentos alternativos no Eurocódigo;
- informações complementares não contraditórias para auxílio do utilizador na aplicação do Eurocódigo.

Ligações entre os Eurocódigos e as especificações técnicas harmonizadas (EN e ETA) relativas aos produtos

É necessária uma consistência entre as especificações técnicas harmonizadas relativas aos produtos de construção e as regras técnicas relativas às obras⁴⁾. Além disso, todas as informações que acompanham a marcação CE dos produtos de construção que fazem referência aos Eurocódigos devem indicar, claramente, quais os Parâmetros Determinados a nível Nacional que foram tidos em conta.

Informações adicionais específicas da EN 1993-1

A presente Norma destina-se a ser utilizada com os Eurocódigos EN 1990 – Bases para o projecto de estruturas, EN 1991 – Acções em estruturas e EN 1992 a EN 1999, quando as estruturas de aço ou de componentes de aço neles são referidas.

A EN 1993-1 é a primeira de seis Partes da EN 1993 – Projecto de estruturas de aço. Apresenta regras de cálculo genéricas destinadas a serem utilizadas com as outras Partes, EN 1993-2 a EN 1993-6. Apresenta também regras complementares específicas para edifícios.

A EN 1993-1 compreende doze Subpartes, EN 1993-1-1 a EN 1993-1-12, cada uma das quais trata de componentes de aço, estados limites ou materiais específicos.

A presente Norma poderá também ser utilizada para os casos de projecto não abrangidos pelos Eurocódigos (outras estruturas, outras acções, outros materiais), servindo como documento de referência para outros Comitês Técnicos do CEN no que respeita a questões relativas a estruturas.

A presente Norma destina-se a ser utilizada por:

- comissões de redacção de normas relativas a materiais e a normas de ensaio e de execução relacionadas com o projecto;
- donos de obra (por exemplo, para a formulação dos seus requisitos específicos);
- projectistas e construtores;
- autoridades competentes.

⁴⁾ Ver n.º 3 do artigo 3º e artigo 12º da DPC, e também 4.2, 4.3.1, 4.3.2 e 5.2 do Documento Interpretativo n.º 1.

NP
EN 1993-1-1
2010

p. 12 de 116

São recomendados valores numéricos para os coeficientes parciais e para outros parâmetros de fiabilidade, de modo a proporcionarem um nível de fiabilidade aceitável, os quais foram seleccionados admitindo a aplicação de um nível adequado de mão-de-obra e de gestão da qualidade.

Anexo Nacional da EN 1993-1-1

Esta Norma estabelece procedimentos alternativos e valores, recomenda classes e inclui notas indicando onde poderão ter de ser feitas opções nacionais. Por este motivo, a Norma Nacional de implementação da EN 1993-1 deverá ter um Anexo Nacional que contenha todos os Parâmetros Determinados a nível Nacional para o projecto de estruturas de aço a serem construídas no país a que diz respeito.

A opção nacional é permitida na EN 1993-1-1 em:

- 2.3.1(1)
- 3.1(2)
- 3.2.1(1)
- 3.2.2(1)
- 3.2.3(1)P
- 3.2.3(3)B
- 3.2.4(1)B
- 5.2.1(3)
- 5.2.2(8)
- 5.3.2(3)
- 5.3.2(11)
- 5.3.4(3)
- 6.1(1)
- 6.1(1)B
- 6.3.2.2(2)
- 6.3.2.3(1)
- 6.3.2.3(2)
- 6.3.2.4(1)B
- 6.3.2.4(2)B
- 6.3.3(5)
- 6.3.4(1)
- 7.2.1(1)B
- 7.2.2(1)B
- 7.2.3(1)B
- BB.1.3(3)B

1 Generalidades

1.1 Objectivo e campo de aplicação

1.1.1 Objectivo e campo de aplicação do Eurocódigo 3

(1) O Eurocódigo 3 aplica-se ao projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil de aço. Obedece aos princípios e requisitos de segurança e de utilização das estruturas e às bases para o seu projecto e verificação indicadas na EN 1990.

(2) O Eurocódigo 3 trata apenas dos requisitos de resistência, utilização, durabilidade e resistência ao fogo das estruturas de aço. Não são, portanto, considerados outros requisitos tais como, por exemplo, os relativos ao isolamento térmico ou acústico.

(3) O Eurocódigo 3 destina-se a ser utilizado em conjunto com:

- EN 1990^{*)} *Basis of structural design*
- EN 1991^{*)} *Actions on structures*
- ENs, ETAGs e ETAs relativas aos produtos de construção relevantes para as estruturas de aço
- EN 1090 *Execution of steel structures – Technical requirements*
- EN 1992 a EN 1999 quando se faz referência a estruturas ou a componentes de aço

(4) O Eurocódigo 3 está subdividido em várias Partes:

EN 1993-1 *Design of steel structures – General rules and rules for buildings*

EN 1993-2 *Design of steel structures – Steel bridges*

EN 1993-3 *Design of steel structures – Towers, masts and chimneys*

EN 1993-4 *Design of steel structures – Silos, tanks and pipelines*

EN 1993-5 *Design of steel structures – Piling*

EN 1993-6 *Design of steel structures – Crane supporting structures*

(5) As EN 1993-2 a EN 1993-6 fazem referência às regras gerais da EN 1993-1. As regras das EN 1993-2 a EN 1993-6 complementam as regras gerais da EN 1993-1.

(6) A EN 1993-1, *General rules and rules for buildings*, é constituída por:

EN 1993-1-1 *Design of steel structures – General rules and rules for buildings*

EN 1993-1-2^{*)} *Design of steel structures – Structural fire design*

EN 1993-1-3 *Design of steel structures – Cold-formed members and sheeting*

EN 1993-1-4 *Design of steel structures – Stainless steels*

EN 1993-1-5 *Design of steel structures – Plated structural elements*

EN 1993-1-6 *Design of steel structures – Strength and stability of shell structures*

EN 1993-1-7 *Design of steel structures – Strength and stability of planar plated structures transversely loaded*

EN 1993-1-8^{*)} *Design of steel structures – Design of joints*

EN 1993-1-9^{*)} *Design of steel structures – Fatigue strength of steel structures*

EN 1993-1-10^{*)} *Design of steel structures – Selection of steel for fracture toughness and through-thickness properties*

EN 1993-1-11 *Design of steel structures – Design of structures with tension components made of steel*

EN 1993-1-12 *Design of steel structures – Supplementary rules for high strength steel*

^{*)} No Anexo Nacional NA são indicadas as normas portuguesas equivalentes (nota nacional).

1.1.2 Objectivo e campo de aplicação da Parte 1-1 do Eurocódigo 3

(1) A presente Norma estabelece os princípios de base para o projecto de estruturas de aço com componentes de espessura $t \geq 3$ mm. Inclui também disposições suplementares para o projecto estrutural de edifícios de aço. Essas disposições suplementares são indicadas pela letra “B” colocada a seguir ao número do parágrafo, ou seja ()B.

NOTA: No caso de elementos enformados a frio e chapas, ver a EN 1993-1-3.

(2) A presente Norma trata dos seguintes assuntos:

Secção 1: Generalidades

Secção 2: Bases para o projecto

Secção 3: Materiais

Secção 4: Durabilidade

Secção 5: Análise estrutural

Secção 6: Estados limites últimos

Secção 7: Estados limites de utilização

(3) As secções 1 e 2 contêm regras adicionais às estabelecidas na EN 1990.

(4) A secção 3 refere-se às propriedades dos materiais de produtos fabricados com aços estruturais de baixa liga.

(5) A secção 4 estabelece regras gerais relativas à durabilidade.

(6) A secção 5 refere-se à análise de estruturas cujo comportamento global pode ser determinado, com precisão suficiente, modelando os elementos como peças lineares.

(7) A secção 6 estabelece regras pormenorizadas para a verificação da segurança de secções e elementos.

(8) A secção 7 estabelece regras relativas aos estados limites de utilização.

1.2 Referências normativas

A presente Norma inclui, por referência, datada ou não, disposições relativas a outras normas. Estas referências normativas são citadas nos lugares apropriados do texto e as normas são listadas a seguir. Para referências datadas, as emendas ou revisões subsequentes de qualquer destas normas só se aplicam à presente Norma se nela incorporadas por emenda ou revisão. Para as referências não datadas, aplica-se a última edição da norma referida (incluindo as emendas).

1.2.1 Normas gerais de referência

EN 1090 *Execution of steel structures – Technical requirements*

EN ISO 12944^{*)} *Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*

EN ISO 1461^{*)} *Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles – Specifications and test methods*

1.2.2 Normas de referência relativas a aço de construção soldável

EN 10025-1:2004 *Hot-rolled products of structural steels – Part 1: General delivery conditions*

EN 10025-2:2004^{*)} *Hot-rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*

^{*)} No Anexo Nacional NA são indicadas as normas portuguesas equivalentes (nota nacional).

- EN 10025-3:2004^{*)} *Hot-rolled products of structural steels – Part 3: Technical delivery conditions for normalized / normalized rolled weldable fine grain structural steels*
- EN 10025-4:2004^{*)} *Hot-rolled products of structural steels – Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels*
- EN 10025-5:2004^{*)} *Hot-rolled products of structural steels – Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance*
- EN 10025-6:2004^{*)} *Hot-rolled products of structural steels – Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition*
- EN 10164:1993 *Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product – Technical delivery conditions*
- EN 10210-1:1994^{**)} *Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain structural steels – Part 1: Technical delivery requirements*
- EN 10219-1:1997^{***)} *Cold formed hollow sections of structural steel – Part 1: Technical delivery requirements*

1.3 Pressupostos

(1) Além dos pressupostos gerais indicados na EN 1990, pressupõe-se o seguinte:

- o fabrico e a montagem são realizados de acordo com a EN 1090.

1.4 Distinção entre Princípios e Regras de Aplicação

(1) Aplicam-se as regras indicadas na EN 1990, 1.4.

1.5 Termos e definições

(1) Aplicam-se as regras indicadas na EN 1990, 1.5.

(2) Os termos e definições indicados seguidamente são utilizados na presente Norma com os seguintes significados:

1.5.1 pórtico

Totalidade ou parte de uma estrutura, compreendendo vários elementos estruturais ligados entre si e projectados para resistirem, em conjunto, às acções aplicadas; este termo refere-se a pórticos propriamente ditos e a estruturas trianguladas; este termo engloba tanto estruturas planas como tridimensionais.

1.5.2 subestrutura

Pórtico que constitui uma parte de um outro pórtico, mas cuja análise estrutural é efectuada separadamente.

1.5.3 tipo de modelo estrutural

Designações utilizadas para fazer a distinção entre modelos de pórticos:

- **semicontínuos**, nos quais as características estruturais dos elementos e ligações têm de ser consideradas explicitamente na análise global;

^{*)} No Anexo Nacional NA é indicada a norma portuguesa equivalente (nota nacional).

^{**)} À data da edição desta Norma, a EN 10210-1:1994 foi substituída pela EN 10210-1:2006 da qual já existe a respectiva versão portuguesa NP EN 10210-1:2008 (nota nacional).

^{***)} À data da edição desta Norma, a EN 10219-1:1997 foi substituída pela EN 10219-1:2006 da qual já existe a respectiva versão portuguesa NP EN 10219-1:2009 (nota nacional).

- **contínuos**, nos quais só as características estruturais dos elementos têm de ser consideradas na análise global;
- **simples**, nos quais não é necessário que as ligações resistam a momentos.

1.5.4 análise global

Determinação de uma distribuição de esforços na estrutura, que esteja em equilíbrio com as acções aplicadas e seja consistente com o método de análise adoptado.

1.5.5 comprimento de referência

Distância, medida sobre um dado plano, entre dois pontos adjacentes de um elemento que estejam contraventados nesse plano ou correspondam a uma das suas extremidades.

1.5.6 comprimento de encurvadura

Comprimento de referência de um elemento articulado nas duas extremidades, em tudo o resto idêntico ao elemento ou segmento de elemento considerado, e com a mesma carga crítica de encurvadura.

1.5.7 efeito de *shear lag*

Distribuição não uniforme de tensões em banzos largos resultante da deformação por corte; é tomado em consideração na verificação da segurança através da consideração de larguras “efectivas” reduzidas dos banzos.

1.5.8 *capacity design*

Método de dimensionamento que visa garantir que se atinge a capacidade de deformação plástica de um elemento, sendo necessária para isso uma resistência adicional às suas ligações e aos elementos que lhe estão ligados.

1.5.9 elemento uniforme

Elemento com secção transversal constante ao longo de todo o comprimento.

1.6 Símbolos

(1) Para os fins da presente Norma utilizam-se os símbolos listados seguidamente.

(2) São ainda utilizados outros símbolos que se definem quando são referidos pela primeira vez.

NOTA: Os símbolos são apresentados de acordo com a ordem da sua introdução no texto da presente Norma. Alguns símbolos poderão ter vários significados.

Secção 1

x-x	eixo longitudinal de um elemento
y-y	eixo de uma secção transversal
z-z	eixo de uma secção transversal
u-u	eixo principal de maior inércia (quando não coincide com o eixo y-y)
v-v	eixo principal de menor inércia (quando não coincide com o eixo z-z)
b	largura de uma secção transversal
h	altura de uma secção transversal
d	altura da parte recta de uma alma
t _w	espessura da alma

t_f	espessura do banzo
r	raio de concordância
r_1	raio de concordância
r_2	raio do bordo
t	espessura

Secção 2

P_k	valor nominal do efeito do pré-esforço aplicado durante a construção
G_k	valor nominal do efeito das acções permanentes
X_k	valores característicos das propriedades dos materiais
X_n	valores nominais das propriedades dos materiais
R_d	valor de cálculo da resistência
R_k	valor característico da resistência
γ_M	coeficiente parcial de segurança (em geral)
γ_{Mi}	coeficiente parcial de segurança (caso particular)
γ_{Mf}	coeficiente parcial de segurança para a fadiga
η	factor de conversão
a_d	valor de cálculo de uma grandeza geométrica

Secção 3

f_y	tensão de cedência
f_u	tensão última
R_{eH}	tensão de cedência de acordo com as normas dos produtos
R_m	tensão de rotura de acordo com as normas dos produtos
A_0	área inicial da secção transversal
ϵ_y	extensão de cedência
ϵ_u	extensão última
Z_{Ed}	valor de cálculo de Z a considerar, resultante das restrições à contracção do metal de base em contacto com o material de adição numa soldadura
Z_{Rd}	valor de cálculo resistente de Z
E	módulo de elasticidade
G	módulo de distorção
ν	coeficiente de Poisson em regime elástico
α	coeficiente de dilatação térmica linear

Secção 5

α_{cr}	factor pelo qual as acções de cálculo teriam que ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global
F_{Ed}	valor de cálculo da carga que actua na estrutura
F_{cr}	valor crítico da carga associado à instabilidade elástica num modo global, determinado com base no valor da rigidez elástica inicial
H_{Ed}	valor de cálculo da carga horizontal total, incluindo as forças equivalentes transmitidas pelo piso (<i>storey shear</i>)
V_{Ed}	valor de cálculo da carga vertical total transmitida pelo piso (<i>storey thrust</i>)
$\delta_{H,Ed}$	deslocamento horizontal relativo entre o topo e a base de um piso
h	altura do piso
$\bar{\lambda}$	esbelteza normalizada
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço normal actuante
ϕ	imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade
ϕ_0	valor de base da imperfeição inicial global associada à falta de verticalidade
α_h	coeficiente de redução para tomar em consideração a altura h do pórtico
h	altura de um pórtico
α_m	coeficiente de redução para tomar em consideração o número de colunas num alinhamento
m	número de colunas num alinhamento
e_0	amplitude da uma imperfeição de um elemento
L	comprimento de um elemento
η_{init}	amplitude do modo crítico de encurvadura elástica
η_{cr}	configuração do modo crítico de encurvadura elástica
$e_{0,d}$	valor de cálculo da amplitude de uma imperfeição
M_{Rk}	valor característico do momento flector resistente da secção transversal condicionante
N_{Rk}	valor característico do esforço normal resistente da secção transversal condicionante
α	factor de imperfeição
$EI \eta_{cr}''$	momento flector devido a η_{cr} na secção transversal condicionante
χ	coeficiente de redução para a curva de dimensionamento (de colunas à encurvadura) relevante
$\alpha_{ult,k}$	valor mínimo do factor de amplificação a aplicar às acções de cálculo para se atingir o valor característico da resistência da secção transversal mais crítica do componente estrutural, considerando o seu comportamento no plano do carregamento sem ter em conta a encurvadura por flexão no plano lateral ou a encurvadura lateral (por flexão-torção), mas tendo no entanto em conta todos os efeitos devidos à deformação geométrica no plano e às imperfeições, globais e locais
α_{cr}	valor mínimo do factor de amplificação dos esforços que é necessário considerar para se atingir a carga crítica de encurvadura elástica
q	força equivalente por unidade de comprimento

δ_q	deslocamento de um sistema de contraventamento no seu plano
q_d	valor de cálculo da força equivalente por unidade de comprimento
M_{Ed}	valor de cálculo do momento flector actuante
k	coeficiente para $e_{0,d}$
ε	extensão
σ	tensão
$\sigma_{com,Ed}$	máximo valor de cálculo da tensão de compressão num elemento
ℓ	comprimento
ε	factor que depende de f_y
c	largura ou altura de parte de uma secção transversal
α	zona comprimida de parte de uma secção transversal
ψ	relação entre tensões ou entre extensões
k_σ	factor de encurvadura de uma placa
d	diâmetro exterior de uma secção tubular circular

Secção 6

γ_{M0}	coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
γ_{M1}	coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
γ_{M2}	coeficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais traccionadas em zonas com furos de ligação
$\sigma_{x,Ed}$	valor de cálculo da tensão longitudinal local actuante
$\sigma_{z,Ed}$	valor de cálculo da tensão transversal local actuante
τ_{Ed}	valor de cálculo da tensão tangencial local actuante
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço normal actuante
$M_{y,Ed}$	valor de cálculo do momento flector actuante, em relação ao eixo y-y
$M_{z,Ed}$	valor de cálculo do momento flector actuante, em relação ao eixo z-z
N_{Rd}	valores de cálculo do esforço normal resistente
$M_{y,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente em relação ao eixo y-y
$M_{z,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente em relação ao eixo z-z
s	passo em quincôncio, entre eixos de dois furos consecutivos de alinhamentos adjacentes, medido na direcção do eixo do elemento
p	distância entre alinhamentos de furos adjacentes medida na direcção normal ao eixo do elemento
n	número de furos ao longo de qualquer linha que atravesse totalmente a largura de um elemento, ou parte dele, em diagonal ou ziguezague
d_0	diâmetro de um furo

e_N	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efectiva (A_{eff}) e bruta
ΔM_{Ed}	valor de cálculo do momento adicional actuante devido ao afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efectiva (A_{eff}) e bruta
A_{eff}	área efectiva de uma secção transversal
$N_{t,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente de tracção
$N_{pl,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta
$N_{u,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil na zona com furos de ligação
A_{net}	área útil de uma secção transversal
$N_{net,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente plástico de tracção da secção transversal útil
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão de uma secção transversal
$M_{c,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente em relação a um eixo principal de uma secção transversal
W_{pl}	módulo de flexão plástico de uma secção transversal
$W_{el,min}$	módulo de flexão elástico mínimo de uma secção transversal
$W_{eff,min}$	módulo de flexão mínimo de uma secção transversal efectiva
A_f	área de um banzo traccionado
$A_{f,net}$	área útil de um banzo traccionado
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal actuante
$V_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente
$V_{pl,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico
A_v	área resistente ao esforço transversal
η	coeficiente para calcular a área de corte
S	momento estático
I	momento de inércia
A	área de uma secção transversal
A_w	área de uma alma
A_f	área de um banzo
T_{Ed}	valor de cálculo do momento torsor total actuante
T_{Rd}	valor de cálculo do momento torsor resistente
$T_{t,Ed}$	valor de cálculo do momento torsor de St. Venant actuante
$T_{w,Ed}$	valor de cálculo do momento torsor não uniforme (de empenamento)
$\tau_{t,Ed}$	valor de cálculo das tensões tangenciais devidas à torção de St. Venant actuante
$\tau_{w,Ed}$	valor de cálculo das tensões tangenciais actuantes associadas à torção não uniforme
$\sigma_{w,Ed}$	valor de cálculo das tensões normais longitudinais devidas ao bimomento B_{Ed}
B_{Ed}	valor de cálculo do bimomento

$V_{pl,T,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico, reduzido pela interacção com o momento torsor
ρ	coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, tendo em conta a interacção com os esforços transversos
$M_{V,Rd}$	valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, reduzidos pela interacção com os esforços transversos
$M_{N,Rd}$	valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, reduzidos pela interacção com o esforço normal
n	relação entre os valores de cálculo dos esforços normais actuante e resistente plástico de uma secção transversal bruta
a	relação entre a área da alma e a área bruta de uma secção transversal
α	parâmetro para tomar em consideração o efeito de flexão desviada
β	parâmetro para tomar em consideração o efeito de flexão desviada
$e_{N,y}$	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efectiva (A_{eff}) e bruta, segundo o eixo y-y
$e_{N,z}$	afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efectiva (A_{eff}) e bruta, segundo o eixo z-z
$W_{eff,min}$	módulo de flexão mínimo de uma secção transversal efectiva
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura de um elemento comprimido
χ	coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado
ϕ	valor para determinar o coeficiente de redução χ
α	factor de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos
a_0, a, b, c, d	designações das curvas de dimensionamento à encurvadura
N_{cr}	valor crítico do esforço normal para o modo de encurvadura elástica considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta
i	raio de giração relativo ao eixo considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta
λ_1	valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}_T$	esbelteza normalizada associada à encurvadura de colunas por torção ou flexão-torção
$N_{cr,TF}$	valor crítico do esforço de encurvadura elástica por flexão-torção
$N_{cr,T}$	valor crítico do esforço de encurvadura elástica por torção
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura lateral (de vigas por flexão-torção)
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
Φ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
α_{LT}	factor de imperfeição para a encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral

M_{cr}	momento crítico elástico de encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT,0}$	comprimento do patamar das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas constituídas por perfis laminados e soldados equivalentes
β	factor de correcção das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas constituídas por perfis laminados e soldados equivalentes
$\chi_{LT,mod}$	coeficiente de redução modificado para a encurvadura lateral
f	factor de correcção de χ_{LT}
k_c	factor de correcção para tomar em consideração o diagrama de momentos
ψ	relação entre os momentos que actuam nas extremidades de um segmento de um elemento
L_c	distância entre travamentos laterais
$\bar{\lambda}_f$	esbelteza normalizada equivalente do banzo comprimido
$i_{f,z}$	raio de giração do banzo comprimido em relação ao eixo de menor inércia da secção
$I_{eff,f}$	momento de inércia da área efectiva de um banzo comprimido em relação ao eixo de menor inércia da secção
$A_{eff,f}$	área efectiva de um banzo comprimido
$A_{eff,w,c}$	área efectiva da zona comprimida de uma alma
$\bar{\lambda}_{c0}$	parâmetro de esbelteza normalizada
$k_{f\ell}$	factor de correcção
$\Delta M_{y,Ed}$	momento devido ao afastamento do eixo baricêntrico y-y
$\Delta M_{z,Ed}$	momento devido ao afastamento do eixo baricêntrico z-z
χ_y	coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo y-y
χ_z	coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo z-z
k_{yy}	factor de interacção
k_{yz}	factor de interacção
k_{zy}	factor de interacção
k_{zz}	factor de interacção
$\bar{\lambda}_{op}$	esbelteza normalizada global, de um elemento ou subestrutura, associada à encurvadura fora do plano de carregamento
χ_{op}	coeficiente de redução correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{op}$
$\alpha_{ult,k}$	valor mínimo do factor de amplificação a aplicar aos valores de cálculo das acções para se atingir o valor característico da resistência da secção transversal condicionante
$\alpha_{cr,op}$	valor mínimo do factor de amplificação a aplicar aos valores de cálculo das acções actuantes no plano para se atingir a carga crítica de encurvadura elástica, fora do plano de carregamento, do elemento ou subestrutura
N_{Rk}	valor característico da resistência à compressão

$M_{y,Rk}$	valor característico da resistência à flexão em torno do eixo y-y
$M_{z,Rk}$	valor característico da resistência à flexão em torno do eixo z-z
Q_m	força de travamento a considerar em cada secção de um elemento onde se forma uma rótula plástica
L_{stable}	comprimento estável de um segmento de um elemento
L_{ch}	comprimento de encurvadura de uma corda
h_0	distância entre os centros de gravidade das cordas de uma coluna composta
a	distância entre pontos de travamento das cordas
α	ângulo entre os eixos de uma corda e de uma diagonal
i_{min}	valor mínimo do raio de giração de uma cantoneira isolada
A_{ch}	área de uma corda de uma coluna composta
$N_{ch,Ed}$	valor de cálculo do esforço normal actuante a meia altura da corda mais comprimida de um elemento composto
M_{Ed}^I	valor de cálculo do momento actuante de primeira ordem máximo a meia altura de um elemento composto
I_{eff}	momento de inércia efectivo de um elemento composto
S_v	rigidez ao esforço transversal associada a um painel de alma de um elemento composto
n	número de planos dos painéis de alma ou das travessas de um elemento composto
A_d	área da secção de uma diagonal de uma coluna composta
d	comprimento de uma diagonal de uma coluna composta
A_v	área da secção de uma corda (ou travessa) de uma coluna composta
I_{ch}	momento de inércia de uma corda no seu plano
I_b	momento de inércia de uma travessa no seu plano
μ	factor de eficiência
i_y	raio de giração relativo ao eixo y-y

Anexo A

C_{my}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mz}	coeficiente de momento uniforme equivalente
C_{mLT}	coeficiente de momento uniforme equivalente
μ_y	factor
μ_z	factor
$N_{cr,y}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y-y
$N_{cr,z}$	valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z-z
C_{yy}	factor

C_{yz}	factor
C_{zy}	factor
C_{zz}	factor
w_y	factor
w_z	factor
n_{pl}	factor
$\bar{\lambda}_{\max}$	maior dos valores de $\bar{\lambda}_y$ e $\bar{\lambda}_z$
b_{LT}	factor
c_{LT}	factor
d_{LT}	factor
e_{LT}	factor
ψ_y	relação entre os momentos de extremidade (em relação ao eixo y-y)
$C_{my,0}$	coeficiente
$C_{mz,0}$	coeficiente
a_{LT}	coeficiente
I_T	constante de torção de St. Venant
I_y	momento de inércia em relação ao eixo y-y
C_1	coeficiente que traduz a relação entre o valor crítico do máximo momento flector num elemento e o valor crítico do momento flector uniforme nesse mesmo elemento considerado com extremidades articuladas
$M_{i,Ed}(x)$	valor máximo do momento de primeira ordem
$ \delta_x $	valor máximo do deslocamento num elemento

Anexo B

α_s	factor (M_s/M_h)
α_h	factor (M_h/M_s)
C_m	coeficiente de momento uniforme equivalente

Anexo AB

γ_G	coeficiente parcial de segurança relativo às acções permanentes
G_k	valor característico das acções permanentes
γ_Q	coeficiente parcial de segurança relativo às acções variáveis
Q_k	valor característico das acções variáveis

Anexo BB

$\bar{\lambda}_{\text{eff},v}$	esbelteza normalizada efectiva para a encurvadura em relação ao eixo v-v
$\bar{\lambda}_{\text{eff},y}$	esbelteza normalizada efectiva para a encurvadura em relação ao eixo y-y
$\bar{\lambda}_{\text{eff},z}$	esbelteza normalizada efectiva para a encurvadura em relação ao eixo z-z
L	comprimento de referência
L_{cr}	comprimento de encurvadura
S	rigidez de esforço transversal proporcionada pelas chapas transversais
I_w	constante de empenamento
$C_{\vartheta,k}$	rigidez de rotação conferida à viga pelo elemento contínuo de travamento e pelas ligações
K_ψ	coeficiente para ter em conta o tipo de análise
K_ϑ	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos e o tipo de restrições
$C_{\vartheta R,k}$	rigidez de rotação conferida à viga pelo elemento contínuo de travamento, admitindo uma ligação rígida à viga
$C_{\vartheta C,k}$	rigidez de rotação da ligação entre a viga e o elemento contínuo de travamento
$C_{\vartheta D,k}$	rigidez de rotação obtida através de uma análise das deformações provocadas pela distorção das secções transversais da viga
L_m	comprimento estável entre apoios laterais adjacentes
L_k	comprimento estável entre apoios adjacentes restringidos à torção
L_s	comprimento estável entre a localização de uma rótula plástica e um apoio adjacente restringido à torção
C_1	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos
C_m	coeficiente para ter em conta a variação linear do momento
C_n	coeficiente para ter em conta a variação não linear do momento
a	distância entre o centro de gravidade do elemento que contém a rótula plástica e o centro de gravidade dos elementos de travamento
B_0	factor
B_1	factor
B_2	factor
η	quociente entre os valores críticos elásticos dos esforços normais
i_s	raio de giração em relação ao centro de gravidade do elemento de travamento
β_t	quociente entre o menor e o maior momento de extremidade, considerando o seu valor algébrico
R_1	valor do momento numa determinada secção de um elemento
R_2	valor do momento numa determinada secção de um elemento
R_3	valor do momento numa determinada secção de um elemento

R_4	valor do momento numa determinada secção de um elemento
R_5	valor do momento numa determinada secção de um elemento
R_E	o maior dos valores R_1 ou R_5
R_s	valor máximo do momento flector em qualquer ponto do comprimento L_y
c	factor de variação da altura da secção transversal
h_h	altura adicional devida ao elemento de reforço ou à variação de altura da secção
h_{max}	altura máxima de uma secção transversal no comprimento L_y
h_{min}	altura mínima de uma secção transversal no comprimento L_y
h_s	altura da secção medida na vertical sem considerar o elemento de reforço
L_h	comprimento do elemento de reforço contido no comprimento L_y
L_y	distância entre os pontos de travamento lateral do banzo comprimido

1.7 Convenções para os eixos dos elementos

(1) A convenção para os eixos dos elementos é a seguinte:

- x-x - eixo longitudinal do elemento
- y-y - eixo da secção transversal
- z-z - eixo da secção transversal

(2) Para os elementos de aço, as convenções utilizadas para os eixos das secções transversais são:

- de um modo geral:
 - y-y - eixo da secção transversal paralelo aos banzos
 - z-z - eixo da secção transversal perpendicular aos banzos
- para as cantoneiras:
 - y-y - eixo paralelo à aba menor
 - z-z - eixo perpendicular à aba menor
- quando necessário:
 - u-u - eixo principal de maior inércia (no caso de não coincidir com o eixo y-y)
 - v-v - eixo principal de menor inércia (no caso de não coincidir com o eixo z-z)

(3) Os símbolos utilizados para as dimensões e eixos das secções transversais dos perfis de aço laminados são indicados na Figura 1.1.

(4) A convenção utilizada para os índices que indicam os eixos dos momentos é a seguinte: "Utilizar o eixo em torno do qual actua o momento".

NOTA: Todas as regras indicadas na presente Norma dizem respeito às propriedades dos eixos principais, geralmente definidos pelos eixos y-y e z-z, excepto para perfis como cantoneiras em que são definidos pelos eixos u-u e v-v.

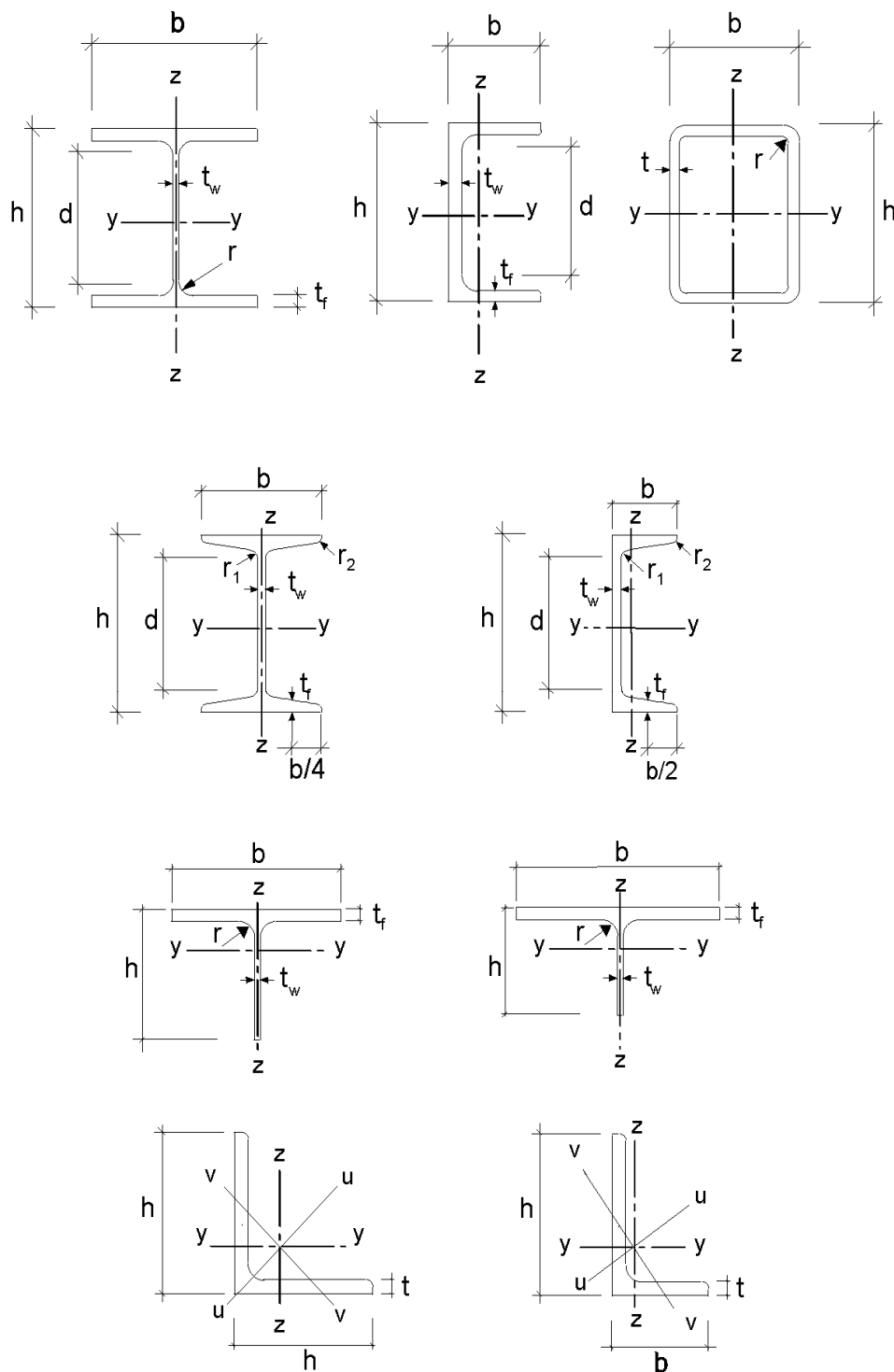


Figura 1.1 – Dimensões e eixos das secções

2 Bases para o projecto

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos gerais

- (1) P O projecto de estruturas de aço deve ser elaborado de acordo com as regras gerais indicadas na EN 1990.
- (2) Deverão também ser respeitadas as disposições suplementares relativas a estruturas de aço indicadas nesta secção 2.
- (3) Deverá considerar-se que os requisitos gerais da secção 2 da EN 1990 são satisfeitos quando a verificação da segurança em relação aos estados limites é efectuada, juntamente com o método dos coeficientes parciais, para as combinações de acções indicadas na EN 1990 e as acções indicadas na EN 1991.
- (4) Deverão ser aplicadas as regras indicadas nas várias Partes da EN 1993 para a determinação das resistências, para a verificação das condições de utilização e da durabilidade.

2.1.2 Gestão da fiabilidade

- (1) Quando são requeridos diferentes níveis de fiabilidade, estes níveis deverão ser assegurados, de preferência, através da adopção de uma gestão da qualidade adequada no projecto e na execução, de acordo com o indicado no Anexo C da EN 1990 e na EN 1090.

2.1.3 Tempo de vida útil de projecto, durabilidade e robustez

2.1.3.1 Generalidades

- (1) P Em função do tipo de acções que afectam a durabilidade e o tempo de vida útil de projecto (ver a EN 1990), as estruturas de aço devem ser:

- projectadas para resistir à corrosão através de:
 - uma adequada protecção da superfície (ver a EN ISO 12944);
 - a utilização de aços autoprotégidos;
 - a utilização de aço inoxidável (ver a EN 1993-1-4);
- pormenorizadas de modo a assegurar um tempo de vida suficiente em relação à fadiga (ver a EN 1993-1-9);
- projectadas para resistir ao desgaste;
- projectadas para resistir às acções de acidente (ver a EN 1991-1-7);
- inspeccionadas e mantidas.

2.1.3.2 Tempo de vida útil de projecto para edifícios

- (1) P,B O tempo de vida útil de projecto deve ser considerado como o período durante o qual se prevê que a estrutura de um edifício seja utilizada para o fim a que se destina.
- (2) B Para a especificação do tempo de vida útil de projecto previsível para um edifício não provisório, ver o Quadro 2.1 da EN 1990.
- (3) B Para os elementos estruturais que não podem ser projectados para a totalidade do tempo de vida útil do edifício, ver 2.1.3.3(3)B.

2.1.3.3 Durabilidade para os edifícios

- (1)P,B Para assegurar a sua durabilidade, os edifícios e os seus componentes devem ser projectados para as acções resultantes do ambiente e da fadiga, quando relevante, ou, em alternativa, protegidos dos seus efeitos.
- (2)P,B Os efeitos da deterioração dos materiais, da corrosão ou da fadiga, quando relevante, devem ser considerados através de uma escolha adequada dos materiais, ver a EN 1993-1-4 e a EN 1993-1-10, e dos pormenores construtivos, ver a EN 1993-1-9, ou através de uma redundância estrutural e da escolha de um adequado sistema de protecção contra a corrosão.
- (3)B Se um edifício incluir componentes cuja substituição necessite ser prevista (por exemplo, apoios em zonas de assentamento do terreno), deverá ser verificada a possibilidade da sua substituição em segurança analisada para uma situação de projecto transitória.

2.2 Princípios para a verificação da segurança em relação aos estados limites

- (1)A resistência das secções transversais e dos elementos especificados neste Eurocódigo 3 em relação aos estados limites últimos conforme definidos na secção 3.3 da EN 1990, baseia-se em ensaios nos quais os materiais evidenciaram uma ductilidade suficiente para permitir a aplicação de modelos de cálculo simplificados.
- (2)As resistências especificadas na presente Norma poderão, portanto, ser utilizadas nos casos em que são satisfeitas as condições relativas aos materiais indicadas na secção 3.

2.3 Variáveis básicas

2.3.1 Acções e influências ambientais

- (1)As acções para o projecto de estruturas de aço deverão ser as indicadas na EN 1991. Para as combinações de acções e respectivos coeficientes parciais, ver o Anexo A da EN 1990.

NOTA 1: O Anexo Nacional poderá definir acções para situações particulares regionais, climáticas ou acidentais.

NOTA 2B: Para definir um carregamento proporcional a utilizar no âmbito de um método incremental, ver o Anexo AB, AB.1.

NOTA 3B: Para definir uma disposição simplificada de cargas, ver o Anexo AB, AB.2.

- (2)As acções a considerar na fase de montagem deverão ser as indicadas na EN 1991-1-6.
- (3)Quando for necessário considerar os efeitos dos assentamentos previstos, diferenciais e absolutos, deverão utilizar-se estimativas fiáveis para as deformações impostas.
- (4)Os efeitos de assentamentos diferenciais, de deformações impostas ou de outras formas de pré-esforço impostas durante a montagem, deverão ser considerados como acções permanentes definidas pelo seu valor nominal, P_k , e agrupados com outras acções permanentes, G_k , numa acção única ($G_k + P_k$).
- (5)As acções de fadiga não definidas na EN 1991 deverão ser determinadas de acordo com o Anexo A da EN 1993-1-9.

2.3.2 Propriedades dos materiais e dos produtos

- (1)As propriedades materiais dos aços e de outros produtos de construção e as grandezas geométricas a utilizar na verificação da segurança deverão ser as especificadas nas ENs, ETAGs ou ETAs aplicáveis, salvo indicação em contrário na presente Norma.

2.4 Verificação pelo método dos coeficientes parciais

2.4.1 Valores de cálculo das propriedades dos materiais

(1) Para o cálculo das estruturas de aço, devem utilizar-se os valores característicos X_k ou os valores nominais X_n das propriedades dos materiais, conforme indicado na presente Norma.

2.4.2 Valores de cálculo das grandezas geométricas

(1) As grandezas geométricas das secções transversais e dos sistemas poderão ser obtidos através das normas dos produtos hEN ou dos desenhos de execução de acordo com a EN 1090, e poderão ser considerados como valores nominais.

(2) Os valores de cálculo das imperfeições geométricas especificados na presente Norma são imperfeições geométricas equivalentes que têm em conta os efeitos:

- das imperfeições geométricas dos elementos, limitadas pelas tolerâncias geométricas definidas nas normas dos produtos ou na norma de execução;
- das imperfeições estruturais resultantes do fabrico e da montagem;
- das tensões residuais;
- da variação da tensão de cedência.

2.4.3 Valores de cálculo da resistência

(1) Para as estruturas de aço aplica-se a expressão (6.6c) ou a expressão (6.6d) da EN 1990:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} = \frac{1}{\gamma_M} R_k (\eta_l X_{k,l}; \eta_i X_{k,i}; a_d) \quad (2.1)$$

em que:

R_k valor característico da resistência considerada, determinado através dos valores característicos ou nominais das propriedades dos materiais e das dimensões;

γ_M coeficiente parcial de segurança global relativo à resistência considerada.

NOTA: Para as definições de η_l , η_i , $X_{k,l}$, $X_{k,i}$ e a_d ver a EN 1990.

2.4.4 Verificação do equilíbrio estático (EQU)

(1) O formato de fiabilidade para a verificação do equilíbrio estático, definido pelo Quadro 1.2(A) do Anexo A da EN 1990, também se aplica às situações de projecto equivalentes a (EQU), como, por exemplo, o cálculo de amarrações ou a verificação em relação ao levantamento de apoios em vigas contínuas.

2.5 Projecto com apoio experimental

(1) Os valores característicos da resistência R_k indicados na presente Norma foram determinados utilizando o Anexo D da EN 1990.

(2) Ao recomendar classes de coeficientes parciais de segurança, γ_{Mi} , os valores característicos da resistência, R_k , foram obtidos a partir de:

$$R_k = R_d \gamma_{Mi} \quad (2.2)$$

em que:

R_d valores de cálculo da resistência, definidos de acordo com o Anexo D da EN 1990;

γ_{Mi} coeficientes parciais de segurança recomendados.

NOTA 1: Os valores numéricos recomendados para os coeficientes parciais de segurança, γ_{Mi} , foram determinados de forma a que R_k represente aproximadamente o quantilho de 5 % para um número infinito de ensaios.

NOTA 2: Para obter os valores característicos da resistência à fadiga e para os coeficientes parciais de segurança, γ_{Mf} , relativos à fadiga, ver a EN 1993-1-9.

NOTA 3: Para obter os valores característicos da resistência à rotura frágil (tenacidade) e os dados para a verificação da segurança correspondente, ver a EN 1993-1-10.

(3) Nos casos em que os valores característicos da resistência, R_k , de produtos prefabricados são determinados com base em ensaios, deverá adoptar-se o procedimento indicado em (2).

3 Materiais

3.1 Generalidades

(1) Os valores nominais das propriedades dos materiais indicados nesta secção 3 deverão ser adoptados, para efeitos de cálculo, como valores característicos.

(2) A presente Norma é aplicável ao cálculo de estruturas executadas com aços que estejam em conformidade com as classes indicadas no Quadro 3.1.

NOTA: Para outros aços e produtos, ver o Anexo Nacional.

3.2 Aço estrutural

3.2.1 Propriedades dos materiais

(1) Os valores nominais da tensão de cedência, f_y , e da tensão última, f_u , para o aço estrutural deverão ser obtidos através de um dos seguintes procedimentos:

a) ou adoptando os valores $f_y = R_{eH}$ e $f_u = R_m$ obtidos directamente da norma do produto;

b) ou utilizando o escalonamento simplificado do Quadro 3.1.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fixar a opção.

3.2.2 Requisitos de ductilidade

(1) Para os aços é requerida uma ductilidade mínima que deverá ser expressa em termos de limites para os valores das seguintes grandezas:

- a relação f_u / f_y entre os valores mínimos especificados da tensão última à tracção f_u e da tensão de cedência f_y ;
- a extensão após rotura, determinada com base num comprimento inicial entre referências de $5,65 \sqrt{A_0}$ (em que A_0 é a área inicial da secção transversal);
- a extensão última ϵ_u , correspondente à tensão última f_u .

NOTA: Os limites dos valores da relação f_u / f_y , da extensão após rotura e da extensão última ϵ_u poderão ser definidos no Anexo Nacional. Recomendam-se os seguintes valores:

- $f_u / f_y \geq 1,10$;
- extensão após rotura não inferior a 15 %;
- $\epsilon_u \geq 15 \epsilon_y$, em que ϵ_y é a extensão de cedência ($\epsilon_y = f_y / E$).

(2) Os aços que estejam em conformidade com uma das classes indicadas no Quadro 3.1 deverão considerar-se como satisfazendo estas condições.

Quadro 3.1 – Valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tracção f_u
para aços estruturais laminados a quente

Norma e classe de aço	Espessura nominal t do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	490	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

(continua)

Quadro 3.1– Valores nominais da tensão de cedência f_y e da tensão última à tracção f_u para secções tubulares (conclusão)

Norma e classe de aço	Espessura nominal t do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

3.2.3 Resistência à rotura frágil (Tenacidade)

(1) P O material deve possuir uma tenacidade suficiente para evitar a rotura frágil dos elementos traccionados sujeitos ao valor da temperatura mínima de serviço que possa ocorrer durante o tempo de vida útil previsto para a estrutura.

NOTA: O valor da temperatura mínima de serviço a adoptar no cálculo poderá ser indicado no Anexo Nacional.

(2) Não é necessário fazer verificações adicionais em relação à rotura frágil, desde que sejam satisfeitas as condições indicadas na EN 1993-1-10 para o valor mínimo da temperatura.

(3) B No caso de componentes de edifícios sujeitos a esforços de compressão, deverá adoptar-se um valor mínimo da resistência à rotura frágil (tenacidade).

NOTA B: O Anexo Nacional poderá conter informação sobre a escolha dos valores da resistência à rotura frágil (tenacidade) para elementos comprimidos. Recomenda-se a utilização do Quadro 2.1 da EN 1993-1-10 para $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$.

(4) Para a escolha de aços em elementos galvanizados a quente, ver a EN ISO 1461.

3.2.4 Propriedades segundo a espessura

(1) No caso em que, de acordo com a EN 1993-1-10, é necessário um aço com propriedades melhoradas segundo a espessura, deverá utilizar-se um aço da classe de qualidade especificada na EN 10164.

NOTA 1: A EN 1993-1-10 contém orientações sobre a escolha das propriedades segundo a espessura.

NOTA 2B: Deverá dar-se uma atenção especial às ligações soldadas entre vigas e colunas e às chapas de extremidade soldadas, traccionadas na direcção da espessura.

NOTA 3B: O Anexo Nacional poderá especificar a correspondência apropriada entre os valores-alvo de Z_{Ed} , definidos na secção 3.2(2) da EN 1993-1-10, e as classes de qualidade indicadas na EN 10164. No caso de edifícios recomenda-se a correspondência definida no Quadro 3.2:

Quadro 3.2 – Escolha da classe de qualidade segundo a EN 10164

Valor-alvo de Z_{Ed} definido na EN 1993-1-10	Valor requerido para Z_{Rd} expresso em termos dos valores de cálculo de Z indicados na EN 10164
$Z_{Ed} \leq 10$	—
$10 < Z_{Ed} \leq 20$	Z 15
$20 < Z_{Ed} \leq 30$	Z 25
$Z_{Ed} > 30$	Z 35

3.2.5 Tolerâncias

(1) As tolerâncias dimensionais e de massa das secções laminadas a quente, das secções tubulares e das chapas deverão estar em conformidade com a norma do produto, ETAG ou ETA relevante, excepto se forem especificadas tolerâncias mais exigentes.

(2) No caso de componentes soldados deverão aplicar-se as tolerâncias indicadas na EN 1090.

(3) Na análise e na verificação de segurança estrutural deverão utilizar-se os valores nominais das dimensões.

3.2.6 Valores de cálculo das propriedades dos materiais

(1) No caso dos aços estruturais abrangidos pela presente Norma, as propriedades a adoptar nos cálculos deverão ser as seguintes:

- módulo de elasticidade $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
- módulo de distorção $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81\,000 \text{ N/mm}^2$
- coeficiente de Poisson em regime elástico $\nu = 0,3$
- coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ por K}$ (para $T \leq 100 \text{ °C}$)

NOTA: Para o cálculo dos efeitos estruturais devidos às diferenças de temperatura em estruturas mistas aço-betão de acordo com a EN 1994, adopta-se o coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ por K}$.

3.3 Dispositivos de ligação

3.3.1 Elementos de ligação

(1) Os requisitos relativos a elementos de ligação são indicados na EN 1993-1-8.

3.3.2 Consumíveis para soldadura

(1) Os requisitos relativos a consumíveis para soldadura são indicados na EN 1993-1-8.

3.4 Outros produtos prefabricados utilizados em edifícios

(1)B Qualquer produto estrutural semiacabado ou acabado considerado na verificação de segurança de estruturas de edifícios deverá obedecer à norma do produto (EN), à ETAG ou à ETA relevante.

4 Durabilidade

(1) Os requisitos gerais relativos à durabilidade são definidos na EN 1990.

(2)P Os meios de execução do tratamento de protecção, realizado no exterior ou no interior do estaleiro, devem estar em conformidade com a EN 1090.

NOTA: A EN 1090 contém os factores que afectam a execução e que têm de ser especificados durante o projecto.

(3) Os componentes susceptíveis à corrosão, ao desgaste mecânico ou à fadiga deverão ser projectados de forma a que a sua inspecção, manutenção ou reconstrução possa ser efectuada de modo satisfatório e que sejam assegurados os acessos para as operações de inspecção e de manutenção, em situação de serviço.

(4)B Em estruturas de edifícios, não é necessária qualquer verificação da resistência em relação à fadiga, excepto nos seguintes casos:

- a) elementos que suportam equipamento de elevação ou cargas rolantes;
- b) elementos sujeitos a ciclos de tensão repetidos devido a vibrações provocadas por máquinas;
- c) elementos sujeitos a vibrações induzidas pelo vento;
- d) elementos sujeitos a oscilações induzidas por multidões.

(5)P No caso de elementos que não possam ser inspeccionados, devem ser adequadamente tomados em consideração os efeitos da corrosão.

(6)B Não é necessário aplicar uma protecção anticorrosão em estruturas interiores de edifícios se a humidade relativa interior não exceder 80 %.

5 Análise estrutural

5.1 Modelação estrutural para a análise

5.1.1 Modelação estrutural e hipóteses fundamentais

(1)P A análise deve basear-se em modelos de cálculo da estrutura adequados ao estado limite considerado.

(2)O modelo de cálculo e as hipóteses fundamentais deverão reflectir, com precisão adequada, o comportamento da estrutura no estado limite considerado e o tipo de comportamento previsto para as secções transversais, os elementos, as ligações e os apoios.

(3)P O método utilizado para a análise deve ser coerente com as hipóteses de cálculo.

(4)B No que se refere à modelação estrutural e às hipóteses fundamentais relativas aos componentes de edifícios, ver também a EN 1993-1-5 e a EN 1993-1-11.

5.1.2 Modelação das ligações

(1) Os efeitos do comportamento das ligações na distribuição dos esforços que actuam numa estrutura e nas suas deformações globais poderão, em geral, ser desprezados. No entanto, estes efeitos deverão ser tidos em conta quando forem significativos (como no caso de ligações semicontínuas), ver a EN 1993-1-8.

(2) Para avaliar se é necessário tomar em consideração os efeitos do comportamento das ligações na análise, poderá efectuar-se a seguinte distinção entre três modelos de ligação, ver a EN 1993-1-8, 5.1.1:

- articulado, no qual se poderá admitir que a ligação não transmite momentos flectores;
- contínuo, no qual se poderá admitir que o comportamento da ligação não influencia a análise;
- semicontínuo, no qual o comportamento da ligação tem que ser considerado na análise.

(3) Os requisitos relativos aos vários tipos de ligação são indicados na EN 1993-1-8.

5.1.3 Interacção terreno-estrutura

(1) As características de deformação dos apoios deverão ser tidas em conta no caso de os seus efeitos serem significativos.

NOTA: A EN 1997 fornece orientações para o cálculo da interacção solo-estrutura.

5.2 Análise global

5.2.1 Efeitos da configuração deformada da estrutura

(1) Os esforços poderão geralmente ser determinados através de:

- análises de primeira ordem, considerando a geometria inicial da estrutura; ou
- análises de segunda ordem, tomando em consideração a influência da configuração deformada da estrutura.

(2) Os efeitos da configuração deformada (efeitos de segunda ordem) deverão ser considerados sempre que aumentem os efeitos das acções ou modifiquem o comportamento estrutural de forma significativa.

(3) Poderá efectuar-se uma análise de primeira ordem da estrutura quando forem desprezáveis os efeitos da configuração deformada no aumento dos esforços ou no comportamento da estrutura. Esta condição poderá considerar-se satisfeita se o seguinte critério for cumprido:

$$\begin{aligned}\alpha_{cr} &= \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 && \text{para a análise elástica} \\ \alpha_{cr} &= \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 && \text{para a análise plástica}\end{aligned}\tag{5.1}$$

em que:

α_{cr} factor pelo qual as acções de cálculo teriam de ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global;

F_{Ed} valor de cálculo do carregamento da estrutura;

F_{cr} valor crítico do carregamento associado à instabilidade elástica num modo global com deslocamentos laterais, determinado com base nos valores de rigidez iniciais.

NOTA: Na expressão (5.1), o valor limite de α_{cr} é superior no caso da análise plástica, o que se deve ao facto de o comportamento estrutural poder ser significativamente influenciado pela não linearidade material no estado limite último (por exemplo, no caso de se formarem na estrutura rótulas plásticas com redistribuição de momentos ou quando ocorrerem deformações não lineares significativas provocadas por ligações semi-rígidas). O Anexo Nacional poderá estipular um limite inferior para α_{cr} em certos tipos de pórticos, desde que esse limite seja fundamentado através de abordagens mais rigorosas.

(4)B Os pórticos de travessas inclinadas com declives pouco acentuados e os pórticos planos com vigas e colunas em edifícios poderão ser verificados em relação ao colapso em modos com deslocamentos laterais através de uma análise de primeira ordem, desde que o critério (5.1) seja satisfeito em cada piso. Nestas estruturas, α_{cr} deverá ser calculado utilizando a seguinte expressão aproximada, desde que a compressão axial nas vigas ou travessas não seja significativa:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) \quad (5.2)$$

em que:

H_{Ed} valor de cálculo da carga horizontal total, incluindo as forças equivalentes (de acordo com 5.3.2(7)) transmitidas pelo piso (*storey shear*);

V_{Ed} valor de cálculo da carga vertical total transmitida pelo piso (*storey thrust*);

$\delta_{H,Ed}$ deslocamento horizontal no topo do piso, medido em relação à sua base, quando se considera um carregamento do pórtico definido pelos valores de cálculo das acções horizontais (por exemplo, devidas ao vento) e das cargas horizontais fictícias, aplicadas ao nível de cada piso;

h altura do piso.

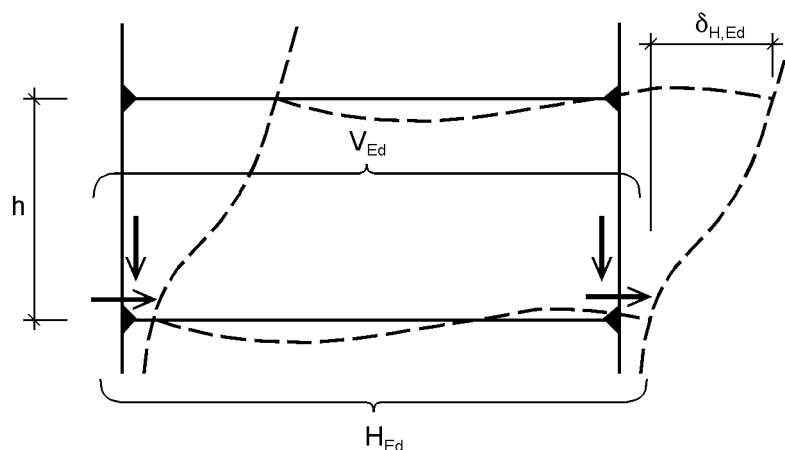


Figura 5.1 – Notações para 5.2.1(4)

NOTA 1B: Para efeitos de aplicação de (4)B e na ausência de informação mais pormenorizada, poderá considerar-se que a inclinação de uma travessa é pouco acentuada se o seu declive não for superior a 1:2 (26°).

NOTA 2B: Para efeitos de aplicação de (4)B e na ausência de informação mais pormenorizada, deverá considerar-se que a compressão axial nas vigas ou travessas é significativa se:

$$\bar{\lambda} \geq 0,3 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}} \quad (5.3)$$

em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de compressão;

$\bar{\lambda}$ esbelteza normalizada no plano do pórtico, calculada admitindo que as vigas ou travessas possuem articulações em ambas as extremidades.

(5) Os efeitos dos fenómenos de *shear lag* e da encurvadura local na rigidez do pórtico deverão ser considerados se influenciarem significativamente a análise global, ver a EN 1993-1-5.

NOTA: Nos casos de perfis laminados e de perfis soldados com dimensões semelhantes, os efeitos de *shear lag* poderão ser desprezados.

(6) Os efeitos do escorregamento em furos de ligações aparafusadas e de deformações semelhantes em elementos de ligação, como por exemplo pernos e cavilhas de fixação, deverão ser considerados sempre que forem relevantes e significativos.

5.2.2 Estabilidade estrutural de pórticos

(1) Se, de acordo com 5.2.1, for necessário ter em consideração a influência da deformação da estrutura, deverá aplicar-se o disposto em (2) a (6) para considerar esses efeitos e para verificar a estabilidade estrutural.

(2) A verificação da estabilidade dos pórticos ou de uma das suas partes deverá ser efectuada considerando as imperfeições e os efeitos de segunda ordem.

(3) De acordo com o tipo de pórtico e de análise global, os efeitos de segunda ordem e as imperfeições poderão ser considerados através de um dos seguintes métodos:

- a) ambos os efeitos incluídos na totalidade numa análise global;
- b) parte dos efeitos incluídos na análise global e os restantes contabilizados nas verificações de segurança dos elementos em relação a fenómenos de instabilidade, de acordo com 6.3;
- c) em casos simples, através de verificações de segurança individuais de elementos equivalentes, em relação a fenómenos de instabilidade, de acordo com 6.3 e utilizando os comprimentos de encurvadura correspondentes ao modo de instabilidade global da estrutura.

(4) Os efeitos de segunda ordem poderão ser calculados através de uma análise apropriada da estrutura (incluindo procedimentos sequenciais ou iterativos). Em pórticos onde o primeiro modo de instabilidade com deslocamentos laterais é predominante, a análise elástica de primeira ordem deverá ser complementada por uma amplificação, através de factores apropriados, dos efeitos relevantes das acções (por exemplo, os momentos flectores).

(5) B Em pórticos de um piso calculados através de uma análise elástica global, os efeitos de segunda ordem associados a deslocamentos laterais, devidos à presença das cargas verticais, poderão ser calculados através da amplificação das cargas horizontais H_{Ed} (por exemplo, devidas ao vento), das cargas equivalentes às imperfeições $V_{Ed} \phi$ (ver 5.3.2(7)) e de todos os outros possíveis efeitos de primeira ordem associados a deslocamentos laterais, amplificação essa efectuada por meio do factor:

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (5.4)$$

desde que se tenha $\alpha_{cr} \geq 3,0$,

em que:

α_{cr} poderá ser calculado através da expressão (5.2) de 5.2.1(4)B, desde que o declive das travessas inclinadas seja pouco acentuado e a compressão axial nas vigas ou travessas não seja significativa, conforme definido em 5.2.1(4)B.

NOTA B: Para $\alpha_{cr} < 3,0$ efectua-se uma análise de segunda ordem mais rigorosa.

(6)B Em pórticos com vários pisos, os efeitos de segunda ordem associados a deslocamentos laterais poderão ser calculados através do método indicado em (5)B, desde que todos os pisos tenham distribuições semelhantes:

- de cargas verticais; e
- de cargas horizontais; e
- de rigidez em relação às acções horizontais.

NOTA B: Para limitações à utilização deste método, ver também 5.2.1(4)B.

(7) De acordo com (3), a estabilidade de cada elemento deverá ser verificada da seguinte forma:

a) quando os efeitos de segunda ordem e as imperfeições em cada elemento (ver 5.3.4) estão totalmente incluídos na análise global da estrutura, não é necessário efectuar verificações de segurança relativas à estabilidade desses elementos de acordo com 6.3;

b) quando alguns dos efeitos de segunda ordem ou das imperfeições de cada elemento (por exemplo, as imperfeições relativas à encurvadura por flexão e/ou à encurvadura lateral, ver 5.3.4) não forem totalmente incluídos na análise global, deverão efectuar-se as verificações de segurança relativas à estabilidade desses elementos, de acordo com os critérios relevantes preconizados em 6.3, de modo a considerar os efeitos não incluídos na análise global. Esta verificação deverá tomar em consideração os esforços actuantes nas secções extremas dos elementos, obtidos através da análise global da estrutura, incluindo os efeitos de segunda ordem e as imperfeições globais (ver 5.3.2), quando relevantes, e poderão utilizar-se comprimentos de encurvadura iguais aos comprimentos reais dos elementos.

(8) Quando a estabilidade de um pórtico é avaliada através de uma verificação de segurança efectuada com base no método da coluna equivalente, de acordo com 6.3, os valores dos comprimentos de encurvadura deverão basear-se no modo de instabilidade global do pórtico que tome em consideração a rigidez dos elementos e ligações, a presença de rótulas plásticas e a distribuição dos esforços de compressão devidos à combinação de acções em análise. Neste caso, os valores de cálculo dos esforços a considerar nas verificações de segurança são obtidos através de uma análise de primeira ordem que não inclui os efeitos das imperfeições.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fornecer informações sobre o domínio de aplicação.

5.3 Imperfeições

5.3.1 Bases

(1) A análise estrutural deverá incorporar, de modo adequado, os efeitos das imperfeições, incluindo tensões residuais e imperfeições geométricas, tais como as faltas de verticalidade, de rectilinearidade, de planura ou de ajustamento, e ainda excentricidades existentes nas ligações da estrutura antes da aplicação do carregamento, que sejam superiores às tolerâncias indicadas na EN 1090-2.

(2) Deverão utilizar-se imperfeições geométricas equivalentes, ver 5.3.2 e 5.3.3, com valores que traduzam os possíveis efeitos de todos os tipos de imperfeições, excepto aqueles que estejam já incluídos nas expressões de resistência utilizadas na verificação de segurança dos elementos, ver 5.3.4.

(3) Deverão considerar-se as seguintes imperfeições:

- a) as imperfeições globais em pórticos e sistemas de contraventamento;

b) as imperfeições locais em elementos considerados individualmente.

5.3.2 Imperfeições para a análise global de pórticos

(1) A configuração admitida para as imperfeições globais e locais poderá ser obtida com base no modo de encurvadura elástico do pórtico no plano de encurvadura considerado.

(2) Deverão considerar-se, com a direcção e configuração mais desfavoráveis, todos os fenómenos de encurvadura, no plano e fora do plano do pórtico, incluindo encurvadura por torção, associados a modos de instabilidade simétricos e assimétricos.

(3) Em pórticos susceptíveis à ocorrência de modos de encurvadura com deslocamentos laterais, o efeito das imperfeições deverá ser incorporado na análise global do pórtico através de uma imperfeição equivalente com a forma de uma inclinação lateral inicial das colunas do pórtico (imperfeição global), e de deformadas iniciais dos seus elementos (imperfeições locais). As amplitudes destas imperfeições poderão determinar-se do seguinte modo:

a) imperfeição global do pórtico, ver a Figura 5.2:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (5.5)$$

em que:

ϕ_0 valor de base: $\phi_0 = 1/200$

α_h coeficiente de redução, calculado em função de h através de:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \text{ mas } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

h altura da estrutura, em m;

α_m coeficiente de redução associado ao número de colunas num piso: $\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$

m número de colunas num piso, incluindo apenas aquelas que estão submetidas a um esforço axial N_{Ed} superior ou igual a 50 % do valor médio por coluna no plano vertical considerado;

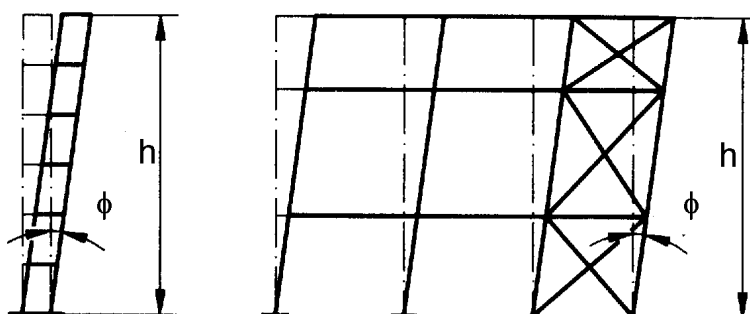


Figura 5.2 – Imperfeições globais equivalentes (inclinação inicial das colunas)

b) imperfeições locais dos elementos, associadas à encurvadura por flexão, de amplitude:

$$e_0 / L \quad (5.6)$$

em que:

L comprimento do elemento.

NOTA: Os valores e_0 / L poderão ser definidos no Anexo Nacional. Os valores recomendados são indicados no Quadro 5.1:

Quadro 5.1 – Valores de cálculo das amplitudes das imperfeições locais e_0 / L para elementos

Curva de encurvadura de acordo com o Quadro 6.2	Análise elástica	Análise plástica
	e_0 / L	e_0 / L
a_0	$1 / 350$	$1 / 300$
a	$1 / 300$	$1 / 250$
b	$1 / 250$	$1 / 200$
c	$1 / 200$	$1 / 150$
d	$1 / 150$	$1 / 100$

(4)B Em pórticos de edifícios, poderá ignorar-se a imperfeição global do pórtico quando:

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed} \quad (5.7)$$

(5)B Para determinar as forças horizontais que actuam nos diafragmas dos pisos, deverá considerar-se uma imperfeição com a configuração indicada na Figura 5.3, em que ϕ é a inclinação inicial das colunas (imperfeição global do pórtico), obtida através de (5.5), para um pórtico com um único piso de altura h , ver (3)a).

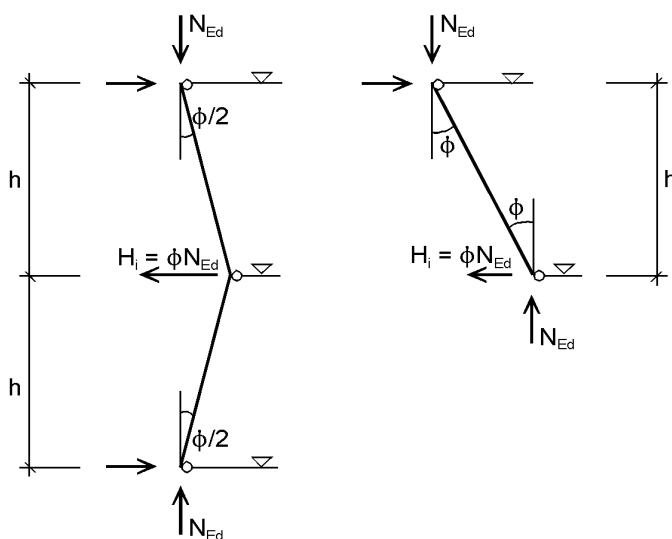


Figura 5.3 – Configuração da imperfeição global do pórtico (inclinação ϕ) para o cálculo das forças horizontais que actuam nos diafragmas dos pisos

(6) Ao efectuar a análise global do pórtico para determinar os esforços nas secções extremas dos elementos a utilizar nas respectivas verificações de segurança, de acordo com 6.3, poderão desprezar-se as imperfeições locais dos elementos. No entanto, em pórticos susceptíveis aos efeitos de segunda ordem (ver 5.2.1(3)), deverão incorporar-se na análise estrutural do pórtico, para além da imperfeição global, as imperfeições locais dos elementos comprimidos que satisfaçam as seguintes condições:

- pelo menos uma das ligações das secções extremas resiste a momentos flectores;

$$- \bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}} \quad (5.8)$$

em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço normal de compressão;

$\bar{\lambda}$ esbelteza normalizada do elemento no plano do pórtico, calculada considerando-o como articulado em ambas as extremidades.

NOTA: As imperfeições locais são tomadas em consideração nas verificações de segurança dos elementos, ver 5.2.2(3) e 5.3.4.

(7) Os efeitos das imperfeições iniciais globais e locais poderão ser substituídos por sistemas de forças horizontais equivalentes aplicados em cada coluna, ver a Figura 5.3 e a Figura 5.4.

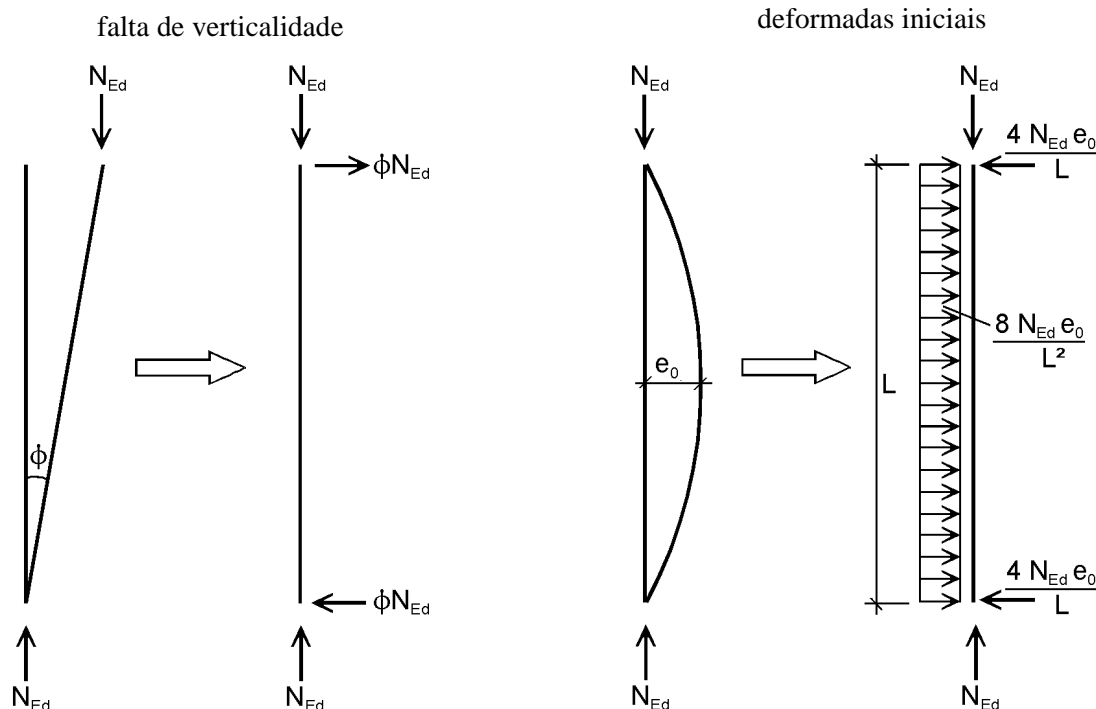
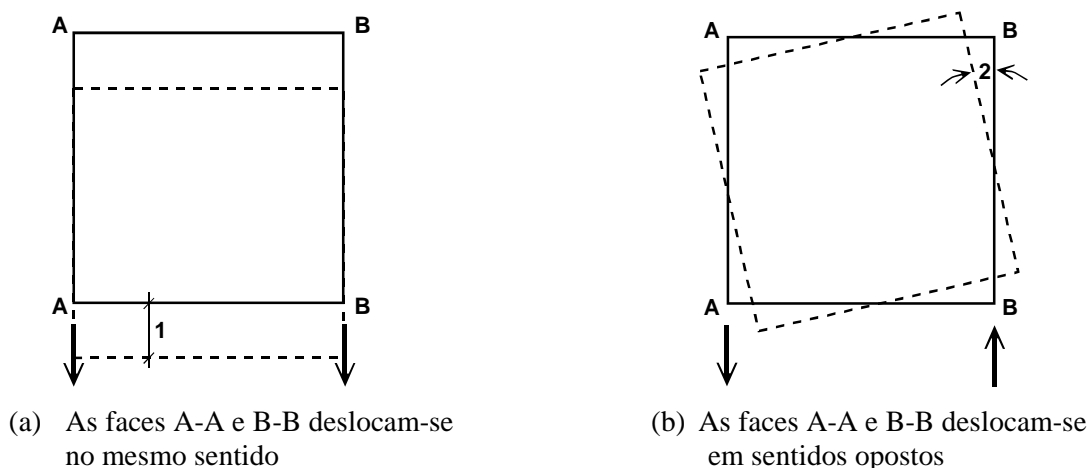


Figura 5.4 – Substituição das imperfeições iniciais por forças horizontais equivalentes

(8) As imperfeições globais deverão considerar-se em todas as direcções horizontais relevantes, mas apenas numa única direcção de cada vez.

(9)B No caso de se considerarem forças equivalentes em pórticos tipo viga-coluna de edifícios com vários pisos, estas deverão aplicar-se ao nível de cada piso e da cobertura.

(10) Deverão igualmente considerar-se os eventuais efeitos de torção provocados por translações anti-simétricas nas faces opostas da estrutura, ver a Figura 5.5.



Legenda:

- 1 translação provocada por deslocamentos laterais
- 2 rotação provocada por deslocamentos laterais

Figura 5.5 – Efeitos de translação e torção (vista em planta)

(11) Em alternativa a (3) e (6), poderá considerar-se uma imperfeição única, simultaneamente global e local, com a configuração do modo crítico de instabilidade elástica η_{cr} . A amplitude desta imperfeição poderá determinar-se através de:

$$\eta_{init} = e_0 \frac{N_{cr}}{EI \left| \eta_{cr} \right|_{max}} \eta_{cr} = \frac{e_0}{\bar{\lambda}^2} \frac{N_{Rk}}{EI \left| \eta_{cr} \right|_{max}} \eta_{cr} \quad (5.9)$$

em que:

$$e_0 = \alpha \left(\bar{\lambda} - 0,2 \right) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^{-2}}{1 - \chi \bar{\lambda}^{-2}} \quad \text{para } \bar{\lambda} > 0,2 \quad (5.10)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad \text{esbelteza normalizada da estrutura;} \quad (5.11)$$

- α factor de imperfeição para a curva de encurvadura relevante, ver o Quadro 6.1 e o Quadro 6.2;
- χ coeficiente de redução para a curva de dimensionamento relevante, a qual depende da secção transversal considerada, ver 6.3.1;
- $\alpha_{ult,k}$ valor mínimo do factor de amplificação da distribuição de esforços axiais N_{Ed} para se atingir o valor característico da resistência N_{Rk} da secção transversal mais solicitada axialmente, calculado sem ter em conta os efeitos de encurvadura;
- α_{cr} valor mínimo do factor de amplificação da distribuição dos esforços axiais N_{Ed} que é necessário considerar para se atingir o carregamento associado à encurvadura elástica;

- M_{Rk} valor característico do momento flector resistente da secção transversal condicionante, por exemplo, $M_{el,Rk}$ ou $M_{pl,Rk}$;
- N_{Rk} valor característico do esforço normal resistente da secção transversal condicionante, isto é $N_{pl,Rk}$;
- $EI \eta_{cr,max}''$ momento flector devido à deformada η_{cr} na secção transversal condicionante;
- η_{cr} configuração do modo crítico de encurvadura elástica.

NOTA 1: Para calcular os factores de amplificação $\alpha_{ult,k}$ e α_{cr} , poderá considerar-se que os elementos da estrutura estão sujeitos apenas aos esforços axiais N_{Ed} obtidos através de uma análise de primeira ordem elástica da estrutura submetida aos valores de cálculo das acções. No caso de se efectuar um cálculo elástico global com verificação do comportamento plástico de uma secção transversal, deverá ser utilizada a expressão linear $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1$.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá fornecer informações sobre o domínio de aplicação de (11).

5.3.3 Imperfeições para a análise dos sistemas de contraventamento

(1) Na análise de sistemas de contraventamento necessários para assegurar a estabilidade lateral ao longo do comprimento de vigas ou elementos comprimidos, os efeitos das imperfeições deverão ser incluídos através de uma imperfeição geométrica equivalente dos elementos a travar, com a forma de uma deformada inicial:

$$e_0 = \alpha_m L / 500 \quad (5.12)$$

em que:

L comprimento do sistema de contraventamento;

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

em que:

m número de elementos a travar.

(2) Se for conveniente, os efeitos das deformadas iniciais dos elementos a travar por um sistema de contraventamento poderão ser substituídos pela força estabilizante equivalente, como indicado na Figura 5.6;

$$q_d = \sum N_{Ed} 8 \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} \quad (5.13)$$

em que:

δ_q deslocamento do sistema de contraventamento, no seu próprio plano, devido a q e a eventuais cargas exteriores, calculado através de uma análise de primeira ordem.

NOTA: δ_q poderá ser considerado igual a 0 no caso de se efectuar uma análise de segunda ordem.

(3) Quando o sistema de contraventamento for necessário para estabilizar o banzo comprimido de uma viga de altura constante, a força N_{Ed} da Figura 5.6 poderá ser obtida através de:

$$N_{Ed} = M_{Ed} / h \quad (5.14)$$

em que:

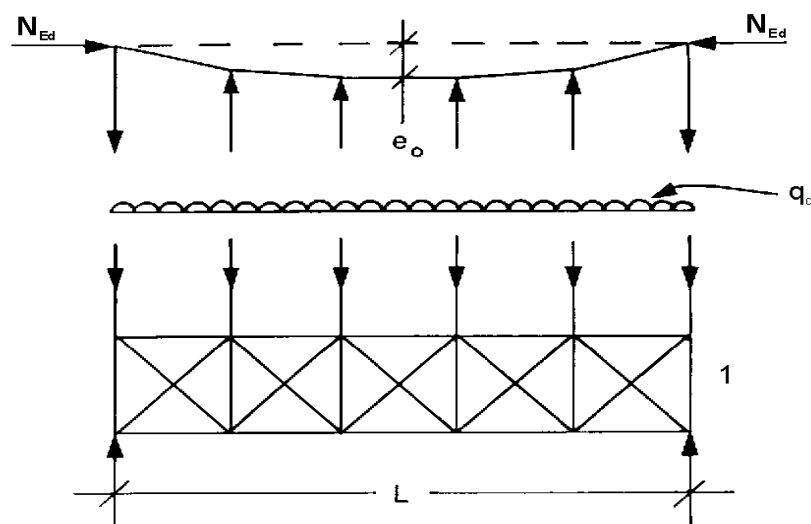
M_{Ed} momento flector máximo na viga;

h altura total da viga.

NOTA: No caso de a viga estar submetida a uma compressão exterior, o valor N_{Ed} deverá incluir uma parte dessa compressão.

(4) Nas secções onde as vigas ou os elementos comprimidos têm emendas, deverá verificar-se que o sistema de contraventamento tem capacidade para resistir a uma força localizada igual a $\alpha_m N_{Ed} / 100$, que lhe é aplicada por cada uma das vigas ou elementos comprimidos emendados nessa secção. Para além disso, a viga ou elemento comprimido deverá ter capacidade para transmitir essas forças entre as secções das emendas e as secções travadas que lhe são adjacentes, ver a Figura 5.7.

(5) Na verificação da força local, de acordo com (4), deverão também incluir-se todas as acções exteriores que actuam no sistema de contraventamento; no entanto, poderão ignorar-se as forças resultantes da imperfeição definida em (1).

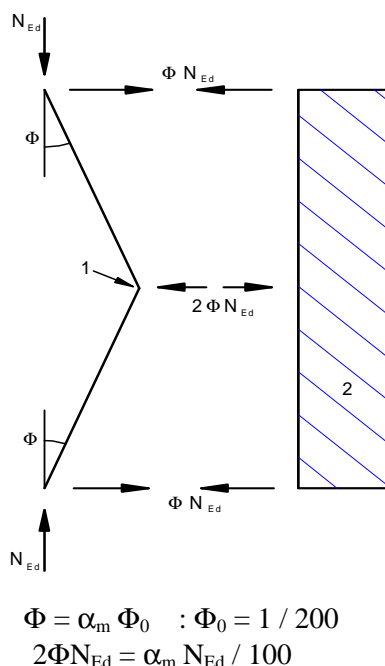


Legenda:

- e_0 imperfeição
- q_d força equivalente por unidade de comprimento
- 1 sistema de contraventamento

Admite-se que a força N_{Ed} é uniforme ao longo do comprimento L do sistema de contraventamento.
No caso de forças não uniformes, esta hipótese é ligeiramente conservativa.

Figura 5.6 – Força estabilizadora equivalente



Legenda:

- 1 ligação de continuidade
- 2 sistema de contraventamento

Figura 5.7 – Forças de contraventamento nas ligações de continuidade em elementos comprimidos

5.3.4 Imperfeições dos elementos

(1) Os efeitos das imperfeições locais dos elementos estão incorporados nas respectivas expressões de verificação da resistência à encurvadura, ver 6.3.

(2) Nos casos em que a estabilidade dos elementos é tomada em consideração por meio de uma análise de segunda ordem, de acordo com 5.2.2(7)a), deverão ser tidas em conta imperfeições dos elementos comprimidos com amplitudes e_0 obtidas a partir de 5.3.2(3)b), 5.3.2(5) ou 5.3.2(6).

(3) No caso de uma análise de segunda ordem que tem em conta a encurvadura lateral de um elemento flectido, poderá adoptar-se uma imperfeição de amplitude $ke_{0,d}$, em que e_0 é a amplitude da imperfeição inicial equivalente associada ao eixo de menor inércia do perfil considerado. Em geral, não é necessário considerar uma imperfeição adicional associada à torção.

NOTA: O Anexo Nacional poderá definir o valor de k . O valor recomendado é $k = 0,5$.

5.4 Métodos de análise considerando o comportamento não linear dos materiais

5.4.1 Generalidades

(1) Os esforços poderão ser determinados através de um dos seguintes métodos:

- a) análise global elástica;
- b) análise global plástica.

NOTA: No caso de uma análise pelo método dos elementos finitos (MEF), ver a EN 1993-1-5.

(2) A análise global elástica poderá ser utilizada em todos os casos.

(3) A análise global plástica só poderá ser utilizada quando a estrutura possui uma capacidade de rotação suficiente nos locais onde se formam rótulas plásticas, tanto nos elementos como nas ligações. No caso de uma rótula plástica se formar num elemento, a sua secção transversal deverá ser monossimétrica ou bissimétrica, sendo um dos planos de simetria o plano de rotação da rótula, e deverá satisfazer os requisitos especificados em 5.6. No caso de uma rótula plástica se formar numa ligação, esta deverá possuir uma resistência suficiente para assegurar que a rótula se mantém apenas no elemento ou deverá ser capaz de assegurar a resistência plástica para uma rotação suficiente, ver a EN 1993-1-8.

(4) B No caso de, numa análise elástica de vigas contínuas, os valores de pico dos momentos flectores excederem os correspondentes momentos flectores plásticos resistentes até 15 % no máximo, poderá adoptar-se um método simplificado de redistribuição plástica limitada dos momentos flectores em que as parcelas excedentes desses momentos são redistribuídas por qualquer outro elemento, desde que:

- a) os esforços no pórtico permaneçam em equilíbrio com as forças aplicadas; e
- b) todos os elementos em que se considere uma redução de momentos tenham secções transversais de Classe 1 ou Classe 2 (ver 5.5); e
- c) seja impedida a encurvadura lateral dos elementos.

5.4.2 Análise global elástica

(1) A análise global elástica deverá basear-se na hipótese de a relação tensão-deformação do material ser linear para qualquer nível de tensões actuates.

NOTA: Para a escolha de um modelo de uma ligação semicontínua, ver 5.1.2.

(2) Os esforços poderão ser calculados por meio de uma análise global elástica, mesmo no caso de a resistência das secções transversais dos elementos se basear na sua resistência plástica, ver 6.2.

(3) A análise global elástica poderá também ser utilizada quando a resistência das secções transversais for limitada pela encurvadura local, ver 6.2.

5.4.3 Análise global plástica

(1) A análise global plástica considera os efeitos do comportamento não linear dos materiais no cálculo dos efeitos provocados pelas acções num sistema estrutural. Este comportamento deverá ser modelado através de um dos seguintes métodos:

- uma análise elasto-plástica em que as secções e/ou ligações plastificadas são modeladas como rótulas plásticas;
- uma análise plástica não linear em que é considerada a plastificação parcial dos elementos ao longo das zonas plásticas;
- uma análise rígido-plástica em que se despreza o comportamento elástico dos troços dos elementos entre rótulas plásticas.

(2) A análise global plástica poderá ser utilizada quando os elementos têm uma capacidade de rotação suficiente para permitir as redistribuições de momentos flectores necessárias, ver 5.5 e 5.6.

(3) A análise global plástica só deverá ser utilizada quando for possível assegurar a estabilidade dos elementos onde se formem as rótulas plásticas, ver 6.3.5.

(4) A relação tensão-deformação bilinear indicada na Figura 5.8 poderá ser utilizada para as classes de aço estrutural especificadas na secção 3. Em alternativa, poderá adoptar-se uma relação mais precisa, ver a EN 1993-1-5.

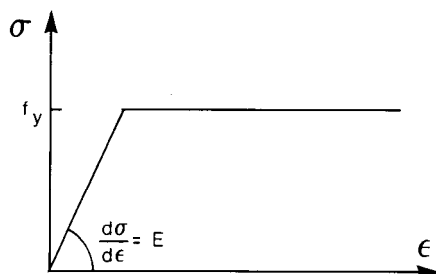


Figura 5.8 – Relação tensão-deformação bilinear

(5) A análise rígido-plástica poderá ser aplicada quando não é necessário considerar os efeitos da configuração deformada da estrutura (i.e., efeitos de segunda ordem). Neste caso, as ligações são classificadas apenas quanto à sua resistência, ver a EN 1993-1-8.

(6) Os efeitos associados à configuração deformada da estrutura e a sua estabilidade deverão ser tidos em consideração de acordo com os princípios indicados em 5.2.

NOTA: A resistência máxima de um pórtico muito flexível poderá ser atingida para uma carga inferior àquela que corresponde à formação de todas as rótulas plásticas associadas ao mecanismo de colapso obtido através de uma análise de primeira ordem.

5.5 Classificação das secções transversais

5.5.1 Bases

(1) A classificação das secções transversais tem como objectivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local.

5.5.2 Classificação

(1) São definidas quatro classes de secções transversais, da seguinte forma:

- as secções transversais da Classe 1 são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- as secções transversais da Classe 2 são aquelas que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;
- as secções transversais da Classe 3 são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido;
- as secções transversais da Classe 4 são aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

(2) Nas secções transversais da Classe 4 poderão adoptar-se larguras efectivas para ter em consideração as reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local, ver a EN 1993-1-5, 4.4.

(3) A classificação de uma secção transversal depende da relação entre a largura e a espessura dos seus componentes comprimidos.

(4) Os componentes comprimidos incluem todas as partes de uma secção transversal que se encontrem total ou parcialmente comprimidas sob o carregamento considerado.

(5) Os diversos componentes comprimidos de uma secção transversal (tais como uma alma ou um banzo) podem, em geral, ser de classes diferentes.

(6) Uma secção transversal é classificada de acordo com a classe mais elevada (menos favorável) dos seus componentes comprimidos, excepto nos casos especificados em 6.2.1(10) e 6.2.2.4(1).

(7) Em alternativa, a classificação de uma secção transversal poderá ser definida pela indicação simultânea da classe do banzo e da classe da alma.

(8) Os valores limites da relação entre as dimensões dos componentes comprimidos das Classes 1, 2 e 3 são indicados no Quadro 5.2. Um componente que não satisfaça os limites da Classe 3 deverá ser considerado como sendo da Classe 4.

(9) Excepto no caso indicado em (10), as secções da Classe 4 poderão ser consideradas como sendo da Classe 3 se as relações largura-espessura forem inferiores aos limites da Classe 3 indicados no Quadro 5.2

considerando o valor de ε multiplicado por $\sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}}$, em que $\sigma_{com,Ed}$ é o valor máximo de cálculo da

tensão de compressão no componente, obtido através de uma análise de primeira ordem ou, se necessário, de segunda ordem.

(10) No entanto, quando a verificação da resistência à encurvadura de um elemento é efectuada de acordo com a secção 6.3, deverão ser sempre adoptados para a Classe 3 os limites indicados no Quadro 5.2.

(11) As secções transversais com uma alma da Classe 3 e banzos da Classe 1 ou 2 poderão ser classificadas como sendo da Classe 2 desde que seja adoptada uma alma efectiva de acordo com 6.2.2.4.

(12) Quando numa secção transversal se considera que a alma resiste apenas ao esforço transversal e se admite que não contribui para a resistência à flexão e ao esforço normal, essa secção poderá ser classificada como sendo da Classe 2, 3 ou 4, apenas em função da classe dos banzos.

NOTA: No caso da encurvadura da alma induzida pelo banzo, ver a EN 1993-1-5.

5.6 Requisitos das secções transversais para uma análise global plástica

(1) No local onde se situe uma rótula plástica, a secção transversal do elemento onde se forma a rótula plástica deverá ter uma capacidade de rotação superior ou igual à necessária nesse local.

(2) Num elemento de secção constante, poderá admitir-se que a capacidade de rotação numa rótula plástica é suficiente se forem satisfeitas as duas condições seguintes:

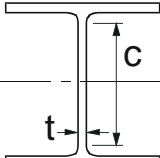
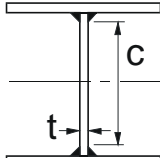
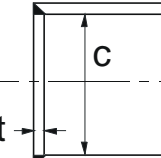
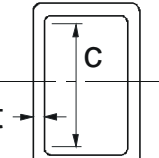
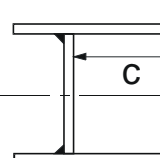
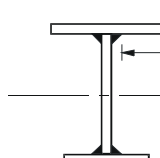
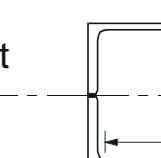
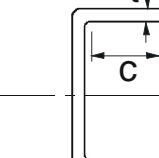
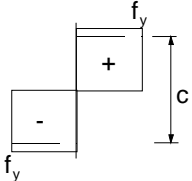
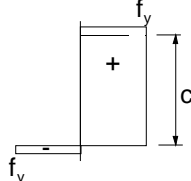
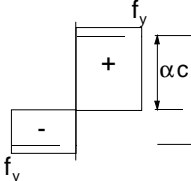
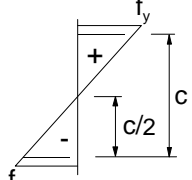
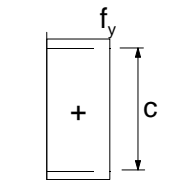
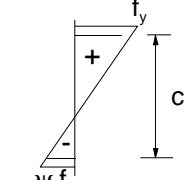
- a) o elemento tem secções transversais da Classe 1 nos locais onde se situem rótulas plásticas;
- b) no caso de se aplicar à alma da secção transversal onde se situe uma rótula plástica uma força transversal superior a 10 % da resistência ao esforço transversal dessa secção, ver 6.2.6, deverão ser colocados reforços da alma a uma distância não superior a $h/2$ da rótula plástica, sendo h a altura da secção transversal.

(3) No caso de a secção transversal do elemento variar ao longo do seu comprimento, deverão ser satisfeitos os seguintes critérios adicionais:

- a) nas zonas adjacentes a uma rótula plástica, a espessura da alma não deverá ser reduzida numa extensão de pelo menos $2d$ ao longo do elemento, medida a partir do local da rótula, sendo d a altura livre da alma nesse local;
- b) nas zonas adjacentes a uma rótula plástica, o banzo comprimido deverá ser da Classe 1 numa extensão medida ao longo do elemento, de cada um dos lados dessa rótula, não inferior ao maior dos seguintes valores:
 - $2d$, em que d é definido em (3)a);

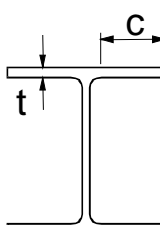
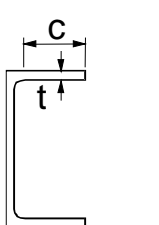
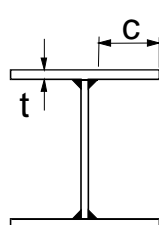
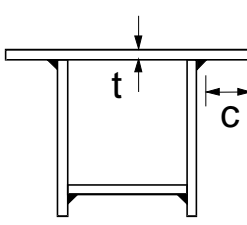
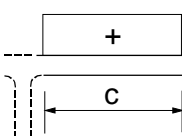
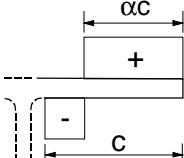
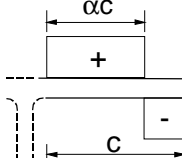
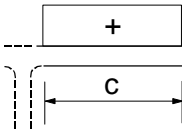
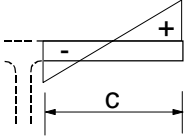
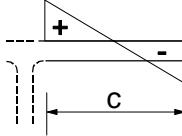
- distância à secção adjacente em que o momento actuante no elemento diminui para 0,8 vezes o momento resistente plástico na secção considerada;
- c) nas restantes zonas do elemento, o banzo comprimido deverá ser da Classe 1 ou 2 e a alma deverá ser da Classe 1, 2 ou 3.
- (4) Nas zonas adjacentes a uma rótula plástica, qualquer furo de uma ligação em zona traccionada deverá satisfazer 6.2.5(4) ao longo da distância definida em (3)b), de cada um dos lados da rótula plástica.
- (5) No que se refere aos requisitos das secções transversais para o cálculo plástico de um pórtico, poderá considerar-se que a capacidade de redistribuição plástica de momentos é suficiente se forem satisfeitos os requisitos de (2) a (4) em todos os elementos em que existam, possam vir a existir ou tenham existido rótulas plásticas sob as cargas de cálculo.
- (6) Nos casos em que se utilize um método de análise global plástico que tenha em consideração as distribuições reais de tensões e extensões ao longo do elemento, incluindo os efeitos combinados dos fenómenos de encurvadura local, de encurvadura do elemento e de encurvadura global da estrutura, não é necessário considerar os requisitos (2) a (5).

Quadro 5.2 (página 1 de 3) – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos

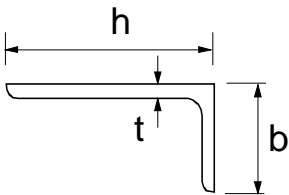
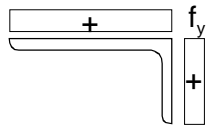
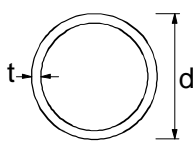
Componentes internos comprimidos						
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$		quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1^*)$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

^{*)} $\psi \leq -1$ aplica-se quando a tensão de compressão $\sigma \leq f_y$ ou quando a extensão de tracção $\epsilon_y > f_y/E$.

Quadro 5.2 (página 2 de 3) – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos

Banzos em consola						
						
Secções laminadas			Secções soldadas			
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão				
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver a EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Quadro 5.2 (página 3 de 3) – Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos

Consultar também “Banzos em consola” (ver página 2 de 3)		<div>Cantoneiras</div> 		Não se aplica a cantoneiras em contacto contínuo com outros componentes		
Classe	Secção comprimida					
Distribuição das tensões na secção (compressão positiva)						
3	$h / t \leq 15\epsilon$ e $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
<div>Secções tubulares</div> 						
Classe	Secção em flexão e/ou compressão					
1	$d / t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d / t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d / t \leq 90\epsilon^2$					
NOTA: Para $d / t > 90\epsilon^2$ ver a EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

6 Estados limites últimos

6.1 Generalidades

(1) Os coeficientes parciais de segurança γ_M definidos em 2.4.3 deverão ser aplicados, aos diversos valores característicos da resistência indicados na presente secção 6, do seguinte modo:

- resistência das secções transversais de qualquer classe: γ_{M0}
- resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento: γ_{M1}
- resistência à rotura de secções transversais traccionadas em zonas com furos de ligação: γ_{M2}
- resistência das ligações: ver a EN 1993-1-8

NOTA 1: Para outros valores numéricos recomendados, ver a EN 1993, Parte 2 a Parte 6. Para estruturas não abrangidas pela EN 1993, Parte 2 a Parte 6, o Anexo Nacional poderá definir os coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} ; recomenda-se que os coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} sejam obtidos a partir da EN 1993-2.

NOTA 2B: Os coeficientes parciais de segurança γ_{Mi} para edifícios poderão ser definidos no Anexo Nacional. Os valores numéricos recomendados para edifícios são os seguintes:

$$\gamma_{M0} = 1,00;$$

$$\gamma_{M1} = 1,00;$$

$$\gamma_{M2} = 1,25.$$

6.2 Resistência das secções transversais

6.2.1 Generalidades

(1) O valor de cálculo do efeito de uma acção em cada secção transversal não deve ser superior ao valor de cálculo da resistência correspondente e, no caso de vários efeitos de acções actuarem simultaneamente, o seu efeito combinado não deve exceder a resistência correspondente a essa combinação.

(2) Os efeitos de *shear lag* e os efeitos da encurvadura local deverão ser tidos em conta através de uma largura efectiva, de acordo com a EN 1993-1-5. Os efeitos da encurvadura por esforço transversal também deverão ser considerados, de acordo com a EN 1993-1-5.

(3) Os valores de cálculo da resistência deverão depender da classificação da secção transversal.

(4) Todas as secções transversais poderão ser objecto de uma verificação elástica, em relação à sua resistência elástica, qualquer que seja a sua classe, desde que, no caso da verificação das secções transversais da Classe 4, sejam utilizadas as propriedades da secção transversal efectiva.

(5) O critério de cedência seguinte poderá ser utilizado para a verificação elástica, de um ponto crítico da secção transversal, a não ser que sejam aplicáveis outras expressões de interacção, ver 6.2.8 a 6.2.10.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \quad (6.1)$$

em que:

$\sigma_{x,Ed}$ valor de cálculo da tensão longitudinal actuante no ponto considerado;

$\sigma_{z,Ed}$ valor de cálculo da tensão transversal actuante no ponto considerado;

τ_{Ed} valor de cálculo da tensão tangencial actuante no ponto considerado.

NOTA: A verificação de acordo com (5) pode ser conservativa, uma vez que exclui a distribuição plástica parcial de tensões, a qual é permitida no cálculo elástico. Por este motivo, só deverá ser realizada nos casos em que não se possa efectuar a verificação com base nas resistências N_{Rd} , M_{Rd} e V_{Rd} .

(6) A resistência plástica das secções transversais deverá ser verificada através de uma distribuição de tensões em equilíbrio com os esforços internos, em que não seja excedida a tensão de cedência. Esta distribuição de tensões deverá ser compatível com as deformações plásticas que lhe estão associadas.

(7) A soma linear das relações esforço/resistência, correspondentes a cada esforço actuante, poderá ser utilizada como uma estimativa conservativa para todas as classes de secções transversais. No caso das secções transversais da Classe 1, 2 ou 3, sujeitas a uma combinação de esforços N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$, este método poderá ser aplicado através do seguinte critério:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (6.2)$$

em que N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ e $M_{z,Rd}$ são os valores de cálculo dos esforços resistentes, os quais dependem da classe da secção transversal e incluem qualquer redução associada aos efeitos do esforço transversal, ver 6.2.8.

NOTA: Para as secções transversais da Classe 4, ver 6.2.9.3(2).

(8) Poderá considerar-se que uma secção transversal é capaz de desenvolver toda a sua resistência plástica à flexão quando todos os seus elementos comprimidos são da Classe 1 ou da Classe 2.

(9) Quando todos os elementos comprimidos de uma secção transversal são da Classe 3, a sua resistência deverá ser calculada com base numa distribuição elástica de extensões na secção. As tensões de compressão nas fibras extremas deverão ser limitadas à tensão de cedência.

NOTA: Para as verificações em relação ao estado limite último, poderá considerar-se que as fibras extremas se situam no plano médio dos banzos. Para a fadiga, ver a EN 1993-1-9.

(10) A determinação da resistência de uma secção transversal da Classe 3, em que a plastificação ocorra primeiro no lado traccionado dessa secção, poderá tomar em consideração a reserva de resistência plástica da zona traccionada, admitindo uma plastificação parcial dessa zona.

6.2.2 Propriedades das secções

6.2.2.1 Secção transversal bruta

(1) As propriedades da secção bruta deverão ser determinadas com base nas suas dimensões nominais. Não é necessário deduzir os furos das ligações, mas outras aberturas maiores deverão ser tomadas em consideração. Os elementos de cobrejunta não deverão ser incluídos.

6.2.2.2 Área útil

(1) A área útil de uma secção transversal deverá ser considerada igual à sua área bruta deduzida de todas as parcelas relativas a furos e a outras aberturas.

(2) No cálculo das propriedades da secção útil, a dedução de um furo de ligação deverá corresponder à área bruta da secção transversal do furo no plano do seu eixo. No caso de furos escareados, deverá tomar-se em consideração a profundidade do escareamento.

(3) Desde que os furos não estejam dispostos em quincôncio, a área total de furos a deduzir deverá ser o valor máximo da soma das áreas das secções dos furos em qualquer secção transversal perpendicular ao eixo do elemento (ver plano de rotura 2 na Figura 6.1).

NOTA: Esta soma máxima traduz a posição da linha crítica de rotura.

(4) Quando os furos estão dispostos em quincôncio, a área total de furos a deduzir deverá ser o maior dos seguintes valores:

a) a área definida em (3), a deduzir quando os furos não estão dispostos em quincôncio;

b)

$$t \left(nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) \quad (6.3)$$

em que:

s passo em quincôncio, entre eixos de dois furos consecutivos de alinhamentos adjacentes, medido na direcção do eixo do elemento;

p distância entre alinhamentos de furos adjacentes medida na direcção normal ao eixo do elemento;

t espessura;

n número de furos ao longo de qualquer linha que atravessa totalmente a largura de um elemento, ou parte dele, em diagonal ou ziguezague, ver a Figura 6.1;

d_0 diâmetro de um furo.

(5) Numa cantoneira ou noutro elemento com furos em mais do que um plano, a distância p deverá ser medida ao longo do plano médio da espessura do material (ver a Figura 6.2).

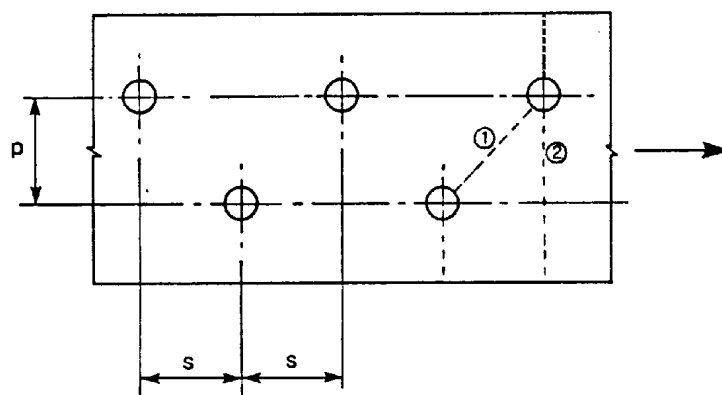


Figura 6.1 – Furos em quincôncio e linhas críticas de rotura 1 e 2

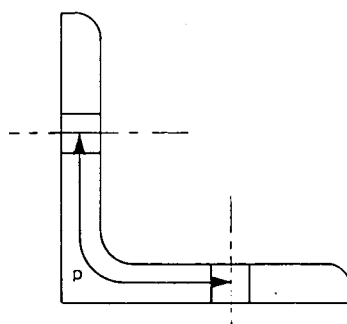


Figura 6.2 – Cantoneiras com furos nas duas abas

6.2.2.3 Efeitos de *shear lag*

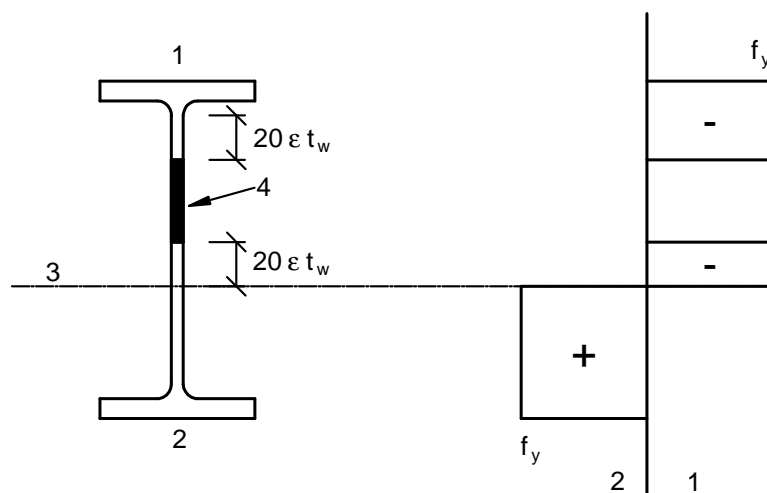
(1) O cálculo das larguras efectivas é coberto pela EN 1993-1-5.

(2) A interacção entre o *shear lag* e a encurvadura local nas secções da Classe 4 deverá ser considerada de acordo com a EN 1993-1-5.

NOTA: Para elementos enformados a frio, ver a EN 1993-1-3.

6.2.2.4 Propriedades efectivas das secções transversais com almas da Classe 3 e banzos da Classe 1 ou 2

(1) No caso de uma secção transversal com uma alma da Classe 3 e banzos da Classe 1 ou 2, classificada como uma secção transversal efectiva da Classe 2, ver 5.5.2(11), a parte comprimida da alma deverá ser substituída por um elemento de alma de altura igual a $20\epsilon t_w$ adjacente ao banzo comprimido, e por outro elemento de alma de altura igual a $20\epsilon t_w$ adjacente ao eixo neutro plástico da secção transversal efectiva, conforme se indica na Figura 6.3.



Legenda:

- 1 compressão
- 2 tracção
- 3 eixo neutro plástico
- 4 desprezar

Figura 6.3 – Alma efectiva da Classe 2

6.2.2.5 Propriedades da secção efectiva das secções transversais da Classe 4

(1) As propriedades da secção efectiva das secções transversais da Classe 4 deverão basear-se nas larguras efectivas das suas partes comprimidas.

(2) No caso de secções enformadas a frio, ver 1.1.2(1) e a EN 1993-1-3.

(3) As larguras efectivas das partes comprimidas deverão ser definidas com base na EN 1993-1-5.

(4) Quando uma secção transversal da Classe 4 está sujeita a um esforço normal de compressão, deverá utilizar-se o método indicado na EN 1993-1-5 para determinar o eventual afastamento e_N entre os centros de gravidade das áreas das secções efectiva (A_{eff}) e bruta e o resultante momento adicional:

$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N \quad (6.4)$$

NOTA: O sinal do momento adicional depende do seu efeito na combinação de esforços, ver 6.2.9.3(2).

(5) No caso de secções circulares tubulares com secções transversais da Classe 4, ver a EN 1993-1-6.

6.2.3 Tracção

(1) P O valor de cálculo do esforço de tracção actuante N_{Ed} em cada secção transversal deve satisfazer a condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

(2) No caso de secções com furos, o valor de cálculo do esforço normal resistente de tracção $N_{t,Rd}$ deverá ser considerado igual ao menor dos seguintes valores:

a) o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

b) o valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil na zona com furos de ligação:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

(3) Nos casos em que seja necessário assegurar a sua capacidade de deformação plástica, ver a EN 1998, o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico, $N_{pl,Rd}$ (definido em 6.2.3(2)a)), deverá ser inferior ao valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil na zona com furos de ligação, $N_{u,Rd}$ (definido em 6.2.3(2)b)).

(4) Nas ligações da Categoria C (ver a EN 1993-1-8, 3.4.1(1)), o valor de cálculo do esforço normal resistente de tracção, $N_{t,Rd}$ (definido em 6.2.3(1)), da secção útil na zona com furos de ligação, deverá ser considerado igual a $N_{net,Rd}$, em que:

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.8)$$

(5) No caso de cantoneiras ligadas por uma aba, ver também a EN 1993-1-8, 3.10.3. O mesmo procedimento deverá ser seguido nos casos de outros tipos de secções ligadas por componentes salientes.

6.2.4 Compressão

(1) P O valor de cálculo do esforço de compressão actuante N_{Ed} em cada secção transversal deve satisfazer a condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.9)$$

(2) O valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão uniforme $N_{c,Rd}$ deverá ser determinado do seguinte modo:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para as secções transversais da Classe 1, 2 ou 3} \quad (6.10)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para as secções transversais da Classe 4} \quad (6.11)$$

(3) Os furos das ligações nos elementos comprimidos não necessitam de ser considerados desde que se encontrem preenchidos com elementos de ligação, excepto nos casos de furos sobredimensionados ou ovalizados conforme definido na EN 1090.

(4) No caso de secções assimétricas da Classe 4, deverá adoptar-se o método indicado em 6.2.9.3, para se tomar em consideração o momento adicional actuante ΔM_{Ed} , devido ao afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efectiva (A_{eff}) e bruta, ver 6.2.2.5(4).

6.2.5 Momento flector

(1) O valor de cálculo do momento flector actuante M_{Ed} em cada secção transversal deve satisfazer a condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.12)$$

em que:

$M_{c,Rd}$ determinado tendo em conta os furos das ligações, ver (4) a (6).

(2) O valor de cálculo do momento flector resistente de uma secção transversal em relação a um dos seus eixos principais é determinado do seguinte modo:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para as secções transversais da Classe 1 ou 2} \quad (6.13)$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para as secções transversais da Classe 3} \quad (6.14)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para as secções transversais da Classe 4} \quad (6.15)$$

em que $W_{el,min}$ e $W_{eff,min}$ se referem à fibra da secção onde a tensão elástica é mais elevada.

(3) No caso de flexão desviada, em relação a ambos os eixos principais da secção, deverão ser utilizados os métodos indicados em 6.2.9.

(4) Os furos das ligações no banzo traccionado poderão ser ignorados desde que nesse banzo:

$$\frac{A_{f,net} 0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.16)$$

em que:

A_f área do banzo traccionado.

NOTA: O critério indicado em (4) assegura a verificação do capacity design (ver 1.5.8).

(5) Os furos das ligações na zona traccionada da alma não necessitam de ser considerados desde que o limite indicado em (4) seja respeitado na totalidade da zona traccionada, incluindo o banzo traccionado e a zona traccionada da alma.

(6) Os furos das ligações na zona comprimida da secção transversal não necessitam de ser considerados desde que se encontrem preenchidos com elementos de ligação, excepto nos casos de furos sobredimensionados ou ovalizados.

6.2.6 Esforço transversal

(1) O valor de cálculo do esforço transversal actuante V_{Ed} em cada secção transversal deve satisfazer a condição:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

em que:

$V_{c,Rd}$ valor de cálculo do esforço transversal resistente. No caso de um cálculo plástico, $V_{c,Rd}$ representa o valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico $V_{pl,Rd}$, definido em (2). No caso de um cálculo elástico, $V_{c,Rd}$ representa o valor de cálculo do esforço transversal resistente elástico, calculado de acordo com (4) e (5).

(2) Na ausência de torção, o valor de cálculo do esforço transversal plástico resistente é obtido por:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (6.18)$$

em que:

A_v área resistente ao esforço transversal.

(3) A área resistente ao esforço transversal A_v poderá ser calculada do seguinte modo:

a) secções laminadas em I e H, carga paralela à alma $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$ mas não inferior a $\eta h_w t_w$

b) secções laminadas em U, carga paralela à alma $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$

c) - secções laminadas em T, carga paralela à alma $A - bt_f + (t_w + 2r)\frac{t_f}{2}$

- secções soldadas em T, carga paralela à alma $t_w \left(h - \frac{t_f}{2} \right)$

d) secções soldadas em I, H e em caixão, carga paralela à alma $\eta \sum (h_w t_w)$

e) secções soldadas em I, H, U e em caixão, carga paralela aos banzos $A - \sum (h_w t_w)$

f) secções laminadas rectangulares tubulares de espessura uniforme:

carga paralela à altura $Ah/(b+h)$

carga paralela à largura $Ab/(b+h)$

g) secções circulares tubulares e tubos de espessura uniforme: $2A/\pi$

em que:

A	área da secção transversal;
b	largura total;
h	altura total;
h_w	altura da alma;
r	raio de concordância;
t_f	espessura dos banzos;
t_w	espessura da alma (se a espessura da alma não for constante, t_w deverá ser considerado igual à espessura mínima);
η	ver a EN 1993-1-5.

NOTA: O valor de η poderá ser considerado igual a 1,0, de forma conservativa.

(4) Para se verificar o esforço transversal resistente elástico, $V_{c,Rd}$, poderá utilizar-se o seguinte critério relativo a um ponto crítico da secção transversal, a não ser que se aplique a verificação em relação à encurvadura especificada na secção 5 da EN 1993-1-5:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0 \quad (6.19)$$

em que τ_{Ed} poderá ser obtido através de: $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t} \quad (6.20)$

em que:

V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal actuante;
S	momento estático, relativamente ao eixo principal da secção, da parte da secção transversal situada entre o ponto considerado e a fronteira da secção;
I	momento de inércia da totalidade da secção transversal;
t	espessura da secção no ponto considerado.

NOTA: A verificação de acordo com (4) é conservativa, uma vez que exclui a distribuição plástica parcial das tensões tangenciais, a qual é permitida no cálculo elástico, ver (5). Por este motivo, só deverá ser realizada nos casos em que não se possa efectuar a verificação com base na resistência $V_{c,Rd}$ de acordo com a expressão (6.17).

(5) No caso de secções em I ou H, a tensão tangencial na alma poderá ser considerada igual a:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \text{ se } A_f / A_w \geq 0,6 \quad (6.21)$$

em que:

A_f	área de um banzo;
A_w	área da alma: $A_w = h_w t_w$.

(6) Além disso, no caso de almas sem reforços intermédios, a verificação da resistência à encurvadura por esforço transversal deverá ser efectuada de acordo com a secção 5 da EN 1993-1-5, se:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\epsilon}{\eta} \quad (6.22)$$

Para obter o valor de η , ver a secção 5 da EN 1993-1-5.

NOTA: O valor de η poderá ser considerado igual a 1,0, de forma conservativa.

(7) Os furos das ligações não necessitam de ser considerados na verificação em relação ao esforço transversal, excepto na determinação do seu valor de cálculo nas zonas de ligação indicadas na EN 1993-1-8.

(8) Nos casos em que o esforço transversal se encontre associado a um momento torsor, o esforço transversal resistente plástico $V_{pl,Rd}$ deverá ser reduzido conforme especificado em 6.2.7(9).

6.2.7 Torção

(1) No caso de elementos sujeitos a torção em que as deformações de distorção poderão ser ignoradas, o valor de cálculo do momento torsor actuante T_{Ed} em cada secção transversal deverá satisfazer a condição:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

em que:

T_{Rd} valor de cálculo do momento torsor resistente da secção transversal.

(2) O momento torsor total actuante T_{Ed} em qualquer secção transversal deverá ser considerado igual à soma de dois efeitos internos:

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed} \quad (6.24)$$

em que:

$T_{t,Ed}$ valor de cálculo do momento torsor de St. Venant actuante;

$T_{w,Ed}$ valor de cálculo do momento torsor não uniforme (de empenamento) actuante.

(3) Os valores de $T_{t,Ed}$ e $T_{w,Ed}$ em qualquer secção transversal poderão ser determinados a partir de T_{Ed} através de uma análise elástica, tendo em conta as propriedades da secção do elemento, as condições de ligação nos apoios e a distribuição das acções ao longo do elemento.

(4) Deverão ser tomadas em consideração as seguintes tensões devidas à torção:

- as tensões tangenciais actuantes $\tau_{t,Ed}$ devidas à torção de St. Venant $T_{t,Ed}$;
- as tensões normais longitudinais actuantes $\sigma_{w,Ed}$ devidas ao bimomento B_{Ed} e as tensões tangenciais actuantes $\tau_{w,Ed}$ associadas à torção não uniforme $T_{w,Ed}$.

(5) No caso de uma verificação elástica, poderá aplicar-se o critério de resistência indicado em 6.2.1(5).

(6) No caso da determinação do momento flector plástico resistente de uma secção transversal em flexão e torção, apenas os efeitos de torção B_{Ed} deverão ser determinados a partir de uma análise elástica, ver (3).

(7) A título simplificativo, poderá considerar-se que os efeitos de empenamento por torção num elemento de secção transversal tubular fechada, como num perfil tubular, podem ser ignorados. Também a título simplificativo, poderá considerar-se que os efeitos da torção de St. Venant num elemento de secção transversal aberta, como num perfil em I ou H, podem ser ignorados.

(8) No cálculo do momento torsor resistente T_{Rd} de secções tubulares fechadas, deverão ser considerados os valores de cálculo do esforço transversal resistente das componentes individuais da secção transversal, conforme indicado na EN 1993-1-5.

(9) No caso de uma combinação de esforço transversal e momento torsor, o valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico com torção deverá ser reduzido de $V_{pl,Rd}$ para $V_{pl,T,Rd}$, e o valor de cálculo do esforço transversal actuante deverá satisfazer a condição:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.25)$$

O valor de $V_{pl,T,Rd}$ poderá ser determinado através de uma das expressões seguintes:

- para uma secção em I ou H:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 (f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}} V_{pl,Rd} \quad (6.26)$$

- para uma secção em U:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 (f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd} \quad (6.27)$$

- para uma secção estrutural tubular:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd} \quad (6.28)$$

em que:

$V_{pl,Rd}$ calculado de acordo com 6.2.6.

6.2.8 Flexão com esforço transversal

(1) Na presença de esforço transversal, os seus efeitos deverão ser tomados em consideração no cálculo do momento flector resistente.

(2) Nos casos em que o esforço transversal seja inferior a metade do esforço transversal resistente plástico, o seu efeito sobre o momento flector resistente poderá ser desprezado, excepto se a resistência da secção for reduzida pela encurvadura por esforço transversal, ver a EN 1993-1-5.

(3) No caso contrário, o momento flector resistente reduzido deverá ser considerado igual ao valor de cálculo da resistência da secção transversal, adoptando-se, na área resistente ao esforço transversal, uma tensão de cedência reduzida:

$$(1 - \rho) f_y \quad (6.29)$$

em que:

$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \text{ e } V_{pl,Rd} \text{ é calculado de acordo com 6.2.6(2).}$$

NOTA: Ver também 6.2.10(3).

(4) No caso da existência de torção, ρ deverá ser calculado a partir de $\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2$, ver 6.2.7, mas o seu valor deverá ser considerado igual a 0 quando $V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,T,Rd}$.

(5) No caso de secções transversais com banzos iguais em I, flectidas em relação ao eixo principal de maior inércia, o valor de cálculo do momento flector resistente plástico, reduzido para ter em conta o esforço transversal, poderá, em alternativa, ser calculado do seguinte modo:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4 t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{mas } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd} \quad (6.30)$$

em que:

$M_{y,c,Rd}$ calculado de acordo com 6.2.5(2);

$$A_w = h_w t_w$$

(6) No caso de interacção entre flexão, esforço transversal e efeitos locais das cargas transversais, ver a secção 7 da EN 1993-1-5.

6.2.9 Flexão composta

6.2.9.1 Secções transversais das Classes 1 e 2

(1) Na presença de um esforço normal, o seu efeito no cálculo do momento flector resistente plástico deverá ser tomado em consideração.

(2) P No caso de secções transversais das Classes 1 e 2, deve ser satisfeito o seguinte critério:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (6.31)$$

em que:

$M_{N,Rd}$ valor de cálculo do momento flector resistente plástico reduzido pelo esforço normal N_{Ed} .

(3) No caso de uma secção rectangular cheia sem furos para ligações, $M_{N,Rd}$ deverá ser determinado de acordo com:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[1 - \left(N_{Ed} / N_{pl,Rd} \right)^2 \right] \quad (6.32)$$

(4) No caso de secções duplamente simétricas com banzos, em I, H ou outras, não é necessário ter em conta o efeito do esforço normal no cálculo do momento flector resistente plástico, em relação ao eixo y-y, quando os dois critérios seguintes são satisfeitos:

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} \quad (6.33)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.34)$$

No caso de secções duplamente simétricas, em I ou H, não é necessário ter em conta o efeito do esforço normal no cálculo do momento flector plástico resistente, em relação ao eixo z-z, quando:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.35)$$

(5) No caso de secções laminadas correntes em I ou H, e de secções soldadas em I ou H com banzos iguais, poderão utilizar-se as seguintes expressões aproximadas, quando não for necessário tomar em consideração os furos das ligações:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1-n)/(1-0,5a) \quad \text{mas } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} \quad (6.36)$$

$$\text{quando } n \leq a: M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad (6.37)$$

$$\text{quando } n > a: M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \quad (6.38)$$

em que:

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$a = (A-2bt_f)/A \quad \text{mas } a \leq 0,5$$

No caso de secções rectangulares tubulares de espessura uniforme, e de secções soldadas em caixão com banzos e almas iguais, poderão utilizar-se as seguintes expressões aproximadas, quando não for necessário tomar em consideração os furos das ligações:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1-n)/(1-0,5a_w) \quad \text{mas } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} \quad (6.39)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} (1-n)/(1-0,5a_f) \quad \text{mas } M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd} \quad (6.40)$$

em que:

$$a_w = (A-2bt)/A \quad \text{mas } a_w \leq 0,5 \quad \text{para secções tubulares}$$

$$a_w = (A-2bt_f)/A \quad \text{mas } a_w \leq 0,5 \quad \text{para secções em caixão soldadas}$$

$$a_f = (A-2ht)/A \quad \text{mas } a_f \leq 0,5 \quad \text{para secções tubulares}$$

$$a_f = (A-2ht_w)/A \quad \text{mas } a_f \leq 0,5 \quad \text{para secções em caixão soldadas}$$

(6) No caso de flexão desviada, poderá adoptar-se o seguinte critério:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1 \quad (6.41)$$

em que:

α e β constantes que poderão, de forma conservativa, ser consideradas iguais à unidade, ou então ser calculadas do seguinte modo:

– secções em I e H:

$$\alpha = 2 ; \beta = 5n \quad \text{mas } \beta \geq 1$$

– secções circulares tubulares:

$$\alpha = 2 ; \beta = 2 \quad \text{e} \quad M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = M_{pl,Rd} (1-n^{1,7})$$

– secções rectangulares tubulares:

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1-1,13n^2} \quad \text{mas } \alpha=\beta \leq 6$$

em que:

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$$

6.2.9.2 Secções transversais da Classe 3

(1)P No caso de secções transversais da Classe 3, e na ausência de esforço transverso, a tensão longitudinal máxima deve satisfazer o critério:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.42)$$

em que:

$\sigma_{x,Ed}$ valor de cálculo da tensão longitudinal local actuante devida ao momento flector e ao esforço normal, tendo em conta, quando necessário, os furos das ligações, ver 6.2.3, 6.2.4 e 6.2.5.

6.2.9.3 Secções transversais da Classe 4

(1)P No caso de secções transversais da Classe 4, e na ausência de esforço transverso, a tensão longitudinal actuante máxima $\sigma_{x,Ed}$, calculada com base nas secções transversais efectivas (ver 5.5.2(2)), deve satisfazer o critério:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

em que:

$\sigma_{x,Ed}$ valor de cálculo da tensão longitudinal actuante devida ao momento flector e ao esforço normal, tendo em conta, quando necessário, os furos das ligações, ver 6.2.3, 6.2.4 e 6.2.5.

(2) Como alternativa ao critério referido em (1)P, poderá ser utilizado o seguinte critério simplificado:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (6.44)$$

em que:

A_{eff} área efectiva da secção transversal, quando submetida a compressão uniforme;

$W_{eff,min}$ módulo de flexão efectivo da secção transversal (referente à fibra da secção onde a tensão elástica é mais elevada), quando submetida apenas a um momento flector em relação ao eixo considerado;

e_N afastamento entre os centros de gravidade da área efectiva (A_{eff}) e da área bruta da secção transversal, quando esta se encontra submetida apenas à compressão, ver 6.2.2.5(4).

NOTA: Os sinais de N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ e $\Delta M_i = N_{Ed} e_{Ni}$ dependem da combinação das respectivas tensões normais.

6.2.10 Flexão composta com esforço transverso

(1) Na presença de esforço normal e de esforço transverso, os seus efeitos deverão ser tomados em consideração no cálculo do momento flector resistente.

(2) Se o valor de cálculo do esforço transverso actuante V_{Ed} não exceder 50 % do valor de cálculo do esforço transverso resistente plástico $V_{pl,Rd}$, não é necessário proceder a qualquer redução dos esforços resistentes definidos em 6.2.9 para a flexão composta, excepto se a resistência da secção for reduzida pela encurvadura por esforço transverso, ver a EN 1993-1-5.

(3) No caso de V_{Ed} exceder 50 % de $V_{pl,Rd}$, os valores de cálculo da resistência da secção transversal à flexão composta deverão ser calculados adoptando-se, na área resistente ao esforço transversal, uma tensão de cedência reduzida:

$$(1-\rho)f_y \quad (6.45)$$

em que:

$$\rho = (2V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$$

$V_{pl,Rd}$ calculado de acordo com 6.2.6(2).

NOTA: Em vez de se reduzir a tensão de cedência, também se poderá reduzir a espessura da parede da parte relevante da secção transversal.

6.3 Resistência dos elementos à encurvadura

6.3.1 Elementos uniformes comprimidos

6.3.1.1 Resistência à encurvadura

(1) Um elemento comprimido deverá ser verificado em relação à encurvadura através de:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.46)$$

em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço axial de compressão;

$N_{b,Rd}$ valor de cálculo da resistência à encurvadura do elemento comprimido.

(2) No caso de elementos com secções assimétricas da Classe 4, deverá considerar-se o momento adicional ΔM_{Ed} associado à excentricidade do eixo neutro da secção efectiva, ver também 6.2.2.5(4), e deverão verificar-se os efeitos da interacção de esforços de acordo com 6.3.4 ou 6.3.3.

(3) O valor de cálculo da resistência à encurvadura de um elemento comprimido deverá ser considerado igual a:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{para as secções transversais das Classes 1, 2 e 3} \quad (6.47)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{para as secções transversais da Classe 4} \quad (6.48)$$

em que:

χ coeficiente de redução para o modo de encurvadura relevante.

NOTA: Na determinação da resistência à encurvadura de elementos de secção variável ou no caso de uma distribuição não uniforme do esforço axial, poderá efectuar-se uma análise de segunda ordem de acordo com 5.3.4(2). Para a verificação da encurvadura fora do plano, ver também 6.3.4.

(4) Para a determinação de A e A_{eff} , não é necessário ter em conta os furos das ligações nas extremidades das colunas.

6.3.1.2 Curvas de encurvadura

(1) No caso de elementos solicitados à compressão axial, o valor de χ , correspondente à adequada esbelteza normalizada $\bar{\lambda}$, deverá ser determinado a partir da curva de encurvadura relevante, através de:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ mas } \chi \leq 1,0 \quad (6.49)$$

em que:

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \text{ para as secções transversais das Classes 1, 2 e 3;}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \text{ para as secções transversais da Classe 4;}$$

α factor de imperfeição;

N_{cr} valor crítico do esforço normal associado ao modo de encurvadura elástica relevante, baseado nas propriedades da secção transversal bruta.

(2) O factor de imperfeição α correspondente à curva de encurvadura apropriada, indicada no Quadro 6.2, deverá ser obtido do Quadro 6.1.

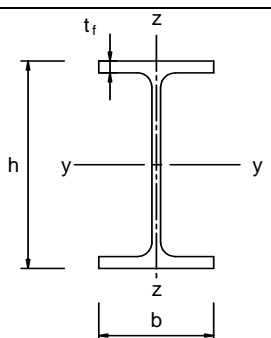
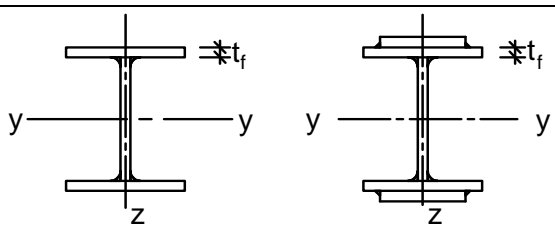
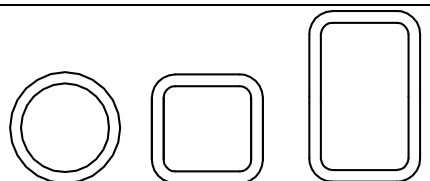
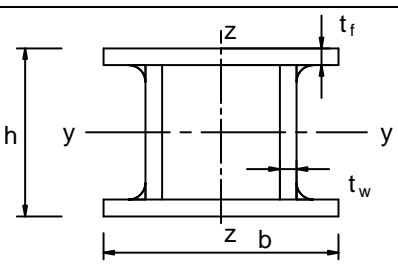
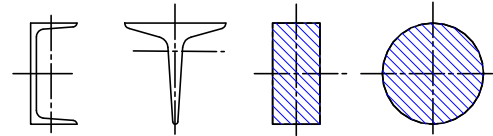
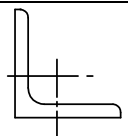
Quadro 6.1 – Factores de imperfeição para as curvas de encurvadura

Curva de encurvadura	a_0	a	b	c	d
Factor de imperfeição α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

(3) Os valores do coeficiente de redução χ correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}$ poderão ser obtidos da Figura 6.4.

(4) Nos casos em que a esbelteza $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ou para $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$, os efeitos da encurvadura poderão ser ignorados, sendo apenas efectuadas as verificações de segurança das secções transversais.

Quadro 6.2 – Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal

Secção transversal		Limites		Encurva- dura em relação ao eixo	Curva de encurvadura	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Perfis laminados		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y – y z – z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y – y z – z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y – y z – z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y – y z – z	d d	c c
Perfis I soldados		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y – y z – z	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		y – y z – z	c d	c d
Secções tubulares		acabadas a quente		qualquer	a	a ₀
		enformadas a frio		qualquer	c	c
Secções em caixão soldadas		em geral (excepto como abaixo indicado)		qualquer	b	b
		soldaduras espessas: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		qualquer	c	c
Perfis U, T e secções cheias				qualquer	c	c
Cantoneiras				qualquer	b	b

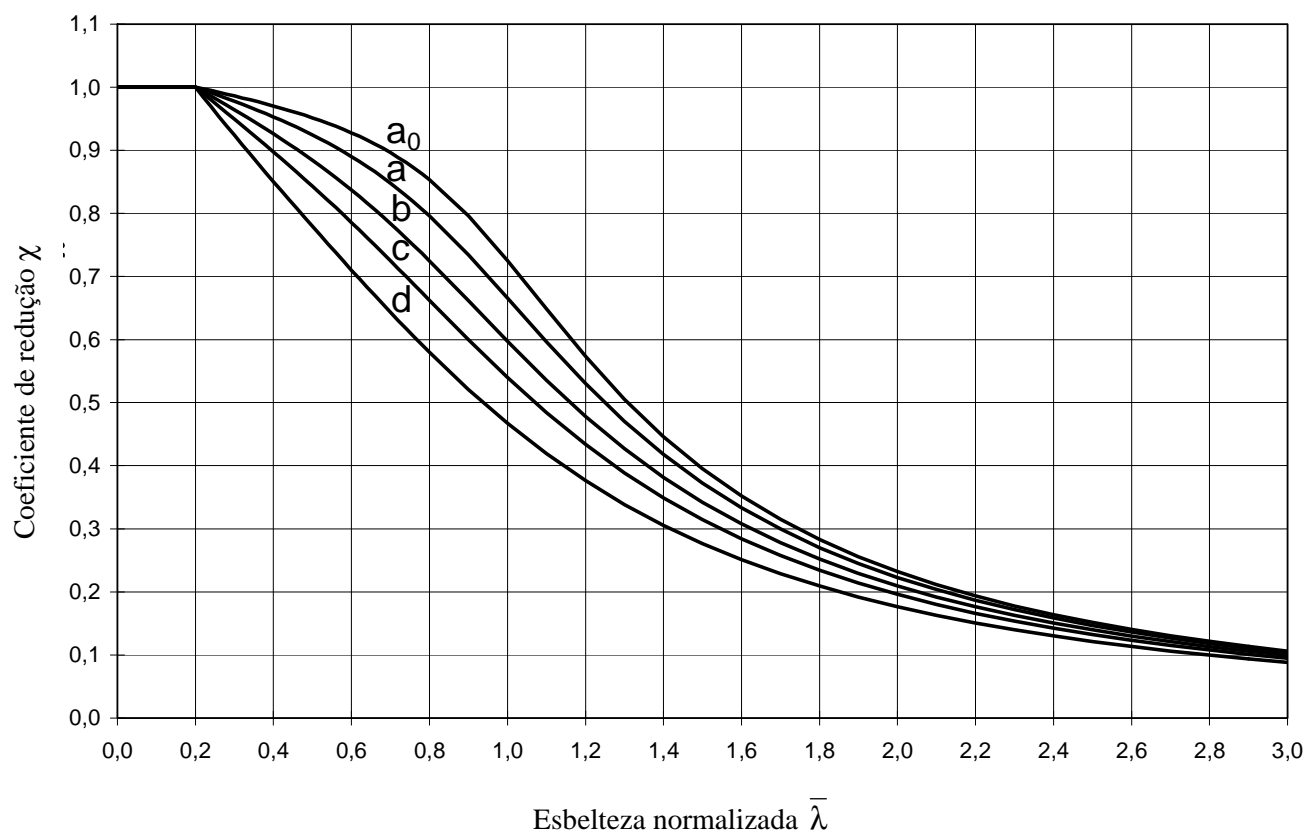


Figura 6.4 – Curvas de encurvadura

6.3.1.3 Esbelteza para a encurvadura por flexão

(1) A esbelteza normalizada $\bar{\lambda}$ é obtida por:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{para as secções transversais das Classes 1, 2 e 3} \quad (6.50)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\lambda_1} \quad \text{para as secções transversais da Classe 4} \quad (6.51)$$

em que:

L_{cr} comprimento de encurvadura no plano de encurvadura considerado;

i raio de giração em relação ao eixo apropriado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \epsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ em N/mm}^2)$$

NOTA B: Para a encurvadura elástica de componentes em estruturas de edifícios, ver o Anexo BB.

(2) Para a encurvadura por flexão, a curva de encurvadura apropriada deverá ser determinada a partir do Quadro 6.2.

6.3.1.4 Esbelteza para a encurvadura por torção ou por flexão-torção

(1) No caso de elementos com secções abertas, deverá considerar-se a possibilidade de a resistência do elemento à encurvadura por torção ou à encurvadura por flexão-torção poder ser inferior à sua resistência à encurvadura por flexão.

(2) A esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_T$ para a encurvadura por torção ou por flexão-torção deverá ser determinada através de:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para as secções transversais das Classes 1, 2 e 3} \quad (6.52)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para as secções transversais da Classe 4} \quad (6.53)$$

em que:

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \quad \text{mas } N_{cr} < N_{cr,T}$$

$N_{cr,TF}$ valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica por flexão-torção;

$N_{cr,T}$ valor crítico do esforço axial associado ao modo de encurvadura elástica por torção.

(3) Para a encurvadura por torção ou por flexão-torção, a curva de encurvadura apropriada poderá ser determinada a partir do Quadro 6.2 considerando as curvas relativas ao eixo z.

6.3.2 Elementos uniformes em flexão

6.3.2.1 Resistência à encurvadura

(1) Um elemento sem travamento lateral e solicitado à flexão em relação ao eixo principal de maior inércia deverá ser verificado em relação à encurvadura lateral através de:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.54)$$

em que:

M_{Ed} valor de cálculo do momento flector actuante;

$M_{b,Rd}$ valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura.

(2) As vigas cujo banzo comprimido tem um travamento lateral suficiente não são susceptíveis à encurvadura lateral. Além disso, as vigas com certos tipos de secções transversais, como por exemplo secções tubulares quadradas ou circulares, secções circulares soldadas ou secções em caixão quadradas, não são susceptíveis à encurvadura lateral.

(3) O valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura de uma viga sem contraventamento lateral deverá ser considerado igual a:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.55)$$

em que:

W_y módulo de flexão adequado considerado do seguinte modo:

$W_y = W_{pl,y}$ para as secções transversais das Classes 1 ou 2;

$W_y = W_{el,y}$ para as secções transversais da Classe 3;

$W_y = W_{eff,y}$ para as secções transversais da Classe 4;

χ_{LT} coeficiente de redução para a resistência à encurvadura lateral.

NOTA 1: A determinação da resistência à encurvadura de vigas de secção variável poderá ser efectuada por uma análise de segunda ordem de acordo com 5.3.4(3). Para a encurvadura fora do plano, ver também 6.3.4.

NOTA 2B: Para a encurvadura de elementos de estruturas de edifícios, ver também o Anexo BB.

(4) Na determinação de W_y , não é necessário ter em conta os furos das ligações na extremidade da viga.

6.3.2.2 Curvas de encurvadura lateral – Caso geral

(1) Salvo indicação em contrário, ver 6.3.2.3, para elementos em flexão com secções transversais constantes, o valor de χ_{LT} correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ deverá ser determinado a partir de:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mas } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (6.56)$$

em que:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

α_{LT} factor de imperfeição;

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

M_{cr} momento crítico elástico para a encurvadura lateral.

(2) M_{cr} baseia-se nas propriedades da secção transversal bruta e tem em consideração as condições de carregamento, a distribuição real dos momentos flectores e os travamentos laterais.

NOTA: O factor de imperfeição α_{LT} correspondente à curva de encurvadura apropriada poderá ser definido no Anexo Nacional. Os valores recomendados de α_{LT} são indicados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Valores recomendados dos factores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Factor de imperfeição α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

As recomendações para a escolha das curvas de encurvadura lateral são indicadas no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais quando é utilizada a expressão (6.56)

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Outras secções transversais	-	d

(3) Os valores do coeficiente de redução χ_{LT} correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ adequada poderão ser obtidos da Figura 6.4.

(4) Para as esbeltezas $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ (ver 6.3.2.3) ou para $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$ (ver 6.3.2.3), os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados, sendo apenas efectuadas as verificações de resistência das secções transversais.

6.3.2.3 Curvas de encurvadura lateral para secções laminadas ou para secções soldadas equivalentes

(1) No caso de secções laminadas ou de secções soldadas equivalentes sujeitas à flexão, os valores de χ_{LT} correspondentes à esbelteza normalizada apropriada poderão ser determinados a partir de:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (6.57)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

NOTA: Os parâmetros $\bar{\lambda}_{LT,0}$ e β , assim como qualquer eventual limitação de validade relativa à altura da viga ou à relação h/b , poderão ser indicados no Anexo Nacional. Os valores seguintes são recomendados para secções laminadas ou para secções soldadas equivalentes:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ (valor máximo)}$$

$$\beta = 0,75 \text{ (valor mínimo)}$$

As recomendações para as curvas de encurvadura são indicadas no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais, quando é utilizada a expressão (6.57)

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

(2) Para ter em conta a distribuição de momentos flectores entre os travamentos laterais dos elementos, o coeficiente de redução χ_{LT} poderá ser modificado da seguinte forma:









$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \text{ mas } \begin{cases} \chi_{LT,mod} \leq 1,0 \\ \chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (6.58)$$

NOTA: Os valores de f poderão ser definidos no Anexo Nacional. Recomendam-se os seguintes valores mínimos:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad \text{mas } f \leq 1,0$$

k_c factor de correcção obtido do Quadro 6.6.

Quadro 6.6 – Factores de correcção k_c

Distribuição de momentos	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

6.3.2.4 Métodos simplificados para vigas com travamentos laterais em edifícios

(1)B Os elementos cujo banzo comprimido tem travamentos laterais discretos, não são susceptíveis à encurvadura lateral se o comprimento L_c entre os travamentos ou a esbelteza resultante $\bar{\lambda}_f$ do banzo comprimido equivalente satisfizerem a condição seguinte:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \quad (6.59)$$

em que:

$M_{y,Ed}$ valor de cálculo do momento flector máximo entre travamentos;

$$M_{c,Rd} = W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

W_y módulo de flexão adequado relativo ao banzo comprimido;

- k_c factor de correcção da esbelteza tendo em consideração a distribuição de momentos entre travamentos, ver o Quadro 6.6;
- $i_{f,z}$ raio de giração, em relação ao eixo de menor resistência da secção, do banzo comprimido equivalente, constituído pelo banzo comprimido acrescido de 1/3 da zona comprimida da alma;
- $\bar{\lambda}_{c,0}$ valor limite da esbelteza do banzo comprimido equivalente anteriormente definido;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ em N/mm}^2)$$

NOTA 1B: Para as secções transversais da Classe 4, $i_{f,z}$ poderá ser considerado igual a:

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{\text{eff},f}}{A_{\text{eff},f} + \frac{I}{3} A_{\text{eff},w,c}}}$$

em que:

- $I_{\text{eff},f}$ momento de inércia efectivo do banzo comprimido em relação ao eixo de menor resistência da secção;
- $A_{\text{eff},f}$ área efectiva do banzo comprimido;
- $A_{\text{eff},w,c}$ área efectiva da zona comprimida da alma.

NOTA 2B: O valor limite da esbelteza $\bar{\lambda}_{c0}$ poderá ser indicado no Anexo Nacional. Recomenda-se o valor limite $\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0,1$, ver 6.3.2.3.

(2)B Se a esbelteza do banzo comprimido $\bar{\lambda}_f$ for superior ao limite indicado em (1)B, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura poderá ser considerado igual a:

$$M_{b,Rd} = k_{f\ell} \chi M_{c,Rd} \quad \text{mas} \quad M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd} \quad (6.60)$$

em que:

- χ coeficiente de redução para o banzo comprimido equivalente determinado com $\bar{\lambda}_f$;
- $k_{f\ell}$ factor de correcção que tem em conta a natureza conservativa do método do banzo comprimido equivalente.

NOTA B: O factor de correcção poderá ser indicado no Anexo Nacional. Recomenda-se o valor $k_{f\ell} = 1,10$.

(3)B Na aplicação de (2)B, deverão considerar-se as seguintes curvas de encurvadura:

- curva d, para as secções soldadas, desde que: $\frac{h}{t_f} \leq 44\varepsilon$

- curva c, para todas as outras secções;

em que:

- h espessura total da secção;
- t_f espessura do banzo comprimido.

NOTA B: Para a encurvadura de elementos com travamentos em estruturas de edifícios, ver também o Anexo BB.3.

6.3.3 Elementos uniformes em flexão composta com compressão

(1) A não ser que seja efectuada uma análise de segunda ordem, utilizando as imperfeições como indicado em 5.3.2, a estabilidade dos elementos uniformes com secções transversais duplamente simétricas não susceptíveis à distorção deverá ser verificada como indicado nesta secção, onde se faz uma distinção entre:

- elementos não susceptíveis às deformações por torção, por exemplo, secções tubulares circulares ou secções travadas em relação à torção;
- elementos susceptíveis às deformações por torção, por exemplo, elementos com secções transversais abertas e não travadas em relação à torção.

(2) Além disso, deverá verificar-se que a resistência das secções transversais em cada extremidade do elemento satisfaz os requisitos indicados em 6.2.

NOTA 1: As expressões de interacção baseiam-se no modelo de um elemento com um único vão, com apoios simples “em forquilha” nas suas extremidades, com ou sem travamento lateral contínuo e solicitado por um esforço normal de compressão, por momentos de extremidade e/ou por cargas transversais.

NOTA 2: Nos casos em que as condições referidas em (1) e (2) não são satisfeitas, ver 6.3.4.

(3) A verificação da resistência de elementos de sistemas estruturais poderá ser efectuada com base em elementos individuais de vão simples, considerados como retirados do sistema. É necessário ter em consideração os efeitos de segunda ordem devidos ao deslocamento lateral do sistema (efeitos P-Δ), quer na determinação dos momentos nas extremidades do elemento, quer por meio de comprimentos de encurvadura adequados, ver, respectivamente, 5.2.2(3)c) e 5.2.2(8).

(4) Os elementos solicitados à flexão composta com compressão deverão satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.62)$$

em que:

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$	valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, respectivamente, em relação aos eixos y-y e z-z;
$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$	momentos devidos ao deslocamento do eixo neutro de acordo com 6.2.9.3 para as secções da Classe 4, ver o Quadro 6.7;
χ_y e χ_z	coeficientes de redução devidos à encurvadura por flexão, conforme 6.3.1;
χ_{LT}	coeficiente de redução devido à encurvadura lateral, conforme 6.3.2;
k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz}	factores de interacção.

Quadro 6.7 – Valores de $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ e $\Delta M_{i,Ed}$

Classe	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

NOTA: No caso de elementos não susceptíveis à deformação por torção, ter-se-ia $\chi_{LT} = 1,0$.

(5) Os factores de interacção k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} dependem do método escolhido.

NOTA 1: Os factores de interacção k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} foram deduzidos a partir de dois métodos alternativos. Os valores destes factores poderão ser obtidos no Anexo A (método alternativo 1) ou no Anexo B (método alternativo 2).

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá definir a escolha entre o método alternativo 1 e o método alternativo 2.

NOTA 3: Como simplificação, as verificações poderão efectuar-se apenas no domínio elástico.

6.3.4 Método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais

(1) O método seguinte poderá ser utilizado nos casos em que não sejam aplicáveis os métodos indicados em 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3. Este método permite a verificação da resistência à encurvadura lateral e à encurvadura por flexão de componentes estruturais tais como:

- elementos isolados com secção transversal monossimétrica (simples ou compostos, de secção uniforme ou variável e com quaisquer condições de apoio), ou
- pórticos planos ou estruturas porticadas secundárias constituídos por aqueles elementos,

solicitados à compressão e/ou à flexão uniaxial no seu plano, mas que não contêm rótulas plásticas com rotações não nulas.

NOTA: O Anexo Nacional poderá especificar o campo e os limites de aplicação deste método.

(2) A resistência global à encurvadura fora do plano de qualquer componente estrutural em conformidade com o campo de aplicação de (1) pode ser assegurada verificando a seguinte condição:

$$\frac{\chi_{op} \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1,0 \quad (6.63)$$

em que:

$\alpha_{ult,k}$ valor mínimo do factor de amplificação a aplicar às acções de cálculo para se atingir o valor característico da resistência da secção transversal mais crítica do componente estrutural, considerando o seu comportamento no plano do carregamento sem ter em conta a encurvadura por flexão no plano lateral ou a encurvadura lateral (por flexão-torção), mas tendo no entanto em conta todos os efeitos devidos à deformação geométrica no plano e às imperfeições, globais e locais;

χ_{op} coeficiente de redução calculado para a esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{op}$, ver (3), para ter em consideração a encurvadura por flexão no plano lateral ou a encurvadura lateral (por flexão-torção).

(3) A esbelteza normalizada global $\bar{\lambda}_{op}$ do componente estrutural deverá ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \quad (6.64)$$

em que:

$\alpha_{ult,k}$ definido em (2);

$\alpha_{cr,op}$ valor mínimo do factor de amplificação a aplicar às acções de cálculo actuates no plano para atingir o carregamento crítico elástico do componente estrutural a encurvadura por flexão no plano lateral ou a encurvadura lateral (por flexão-torção), sem ter em consideração a encurvadura por flexão no plano.

NOTA: A determinação de $\alpha_{cr,op}$ e $\alpha_{ult,k}$ poderá ser feita a partir de uma análise por elementos finitos.

(4) O coeficiente de redução χ_{op} poderá ser determinado por um dos seguintes métodos:

a) o valor mínimo de:

χ para a encurvadura por flexão de acordo com 6.3.1;

χ_{LT} para a encurvadura lateral de acordo com 6.3.2;

cada um calculado para a esbelteza normalizada global $\bar{\lambda}_{op}$.

NOTA: Por exemplo, no caso em que $\alpha_{ult,k}$ é determinado pela verificação da resistência da secção transversal $\frac{I}{\alpha_{ult,k}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}$ este método conduz a:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq \chi_{op} \quad (6.65)$$

b) um valor interpolado entre os valores χ e χ_{LT} como determinados de acordo com o indicado em a), utilizando a expressão que permite obter $\alpha_{ult,k}$ na secção transversal crítica.

NOTA: Por exemplo, no caso em que $\alpha_{ult,k}$ é determinado pela verificação da resistência da secção transversal $\frac{I}{\alpha_{ult,k}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}$ este método conduz a:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq I \quad (6.66)$$

6.3.5 Encurvadura lateral de elementos com rótulas plásticas

6.3.5.1 Generalidades

(1)B As estruturas poderão ser dimensionadas com base na análise plástica desde que a encurvadura lateral no pórtico seja impedida pelas seguintes formas:

- existam travamentos nas posições das rótulas plásticas com rotação plástica não nula, ver 6.3.5.2; e
- seja verificada a existência de um comprimento estável para os troços de elemento situados entre esses travamentos e outros travamentos laterais, ver 6.3.5.3.

(2)B Não é necessário qualquer travamento no caso em que a rótula plástica tenha uma rotação plástica nula tendo em consideração todas as combinações de acções no estado limite último.

6.3.5.2 Travamentos nas rótulas plásticas com rotação plástica não nula

(1)B No local de cada rótula plástica com rotação plástica não nula, a secção transversal deverá possuir um elemento de travamento eficaz em relação à encurvadura com a resistência adequada às forças laterais e à torção induzidas pelas deformações plásticas que ocorrem nesse local do elemento.

(2)B Deverá adoptar-se um travamento eficaz no caso de:

- elementos solicitados à flexão simples ou à flexão composta com esforço normal, através do travamento lateral de ambos os banzos. Este travamento poderá ser realizado pelo travamento lateral de um dos banzos e pelo travamento rígido em relação à torção da secção transversal, impedindo o deslocamento lateral do banzo comprimido em relação ao banzo traccionado, ver a Figura 6.5;
- elementos solicitados à flexão simples ou à flexão composta com esforço normal de tracção, nos quais o banzo comprimido está em contacto com uma laje de pavimento, através de um travamento lateral e de torção do banzo comprimido (por exemplo, ligação à laje, ver a Figura 6.6). No caso de secções transversais mais esbeltas do que secções em I e H laminadas, a distorção da secção transversal deverá ser impedida ao nível das rótulas plásticas (por exemplo, através de um reforço da alma ligado ao banzo comprimido e de uma ligação rígida do banzo comprimido à laje).

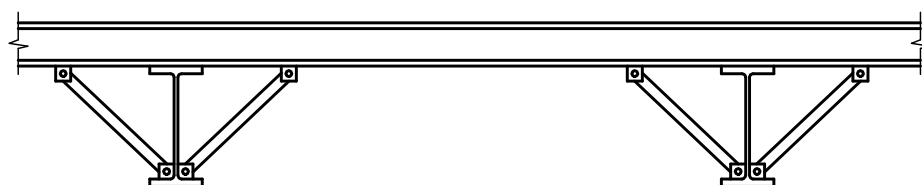
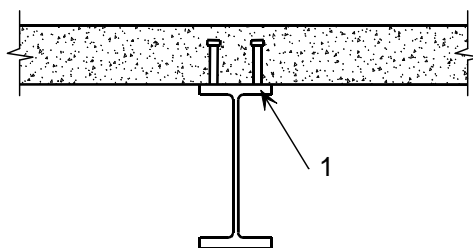


Figura 6.5 – Exemplo típico de um travamento rígido em relação à torção



Legenda:

1 banzo comprimido

Figura 6.6 – Exemplo típico de travamento lateral e em relação à torção do banzo comprimido através de uma laje

(3)B No local de cada uma das rótulas plásticas, as ligações (por exemplo, pernos) do banzo comprimido ao elemento de travamento nesse ponto (por exemplo, uma madre), e qualquer elemento intermédio de transmissão de esforços (por exemplo, um travamento diagonal) deverão ser dimensionados para resistir a uma força local com um mínimo de 2,5 % de $N_{f,Ed}$ (definido em 6.3.5.2(5)B) transmitida pelo banzo no seu plano e perpendicular ao plano da alma, não sendo esta força combinada com quaisquer outras cargas.

(4)B Quando na prática não for possível realizar um travamento desse tipo directamente na posição da rótula, o travamento deverá ser colocado a uma distância medida ao longo do elemento não superior a $h/2$, em que h é a altura total da secção transversal em que se forma a rótula plástica.

(5)B No cálculo de sistemas de contraventamento, ver 5.3.3, para além da verificação das imperfeições de acordo com 5.3.3 deverá verificar-se que o sistema de contraventamento é capaz de resistir aos efeitos das forças locais Q_m aplicadas em cada elemento estabilizado ao nível das rótulas plásticas, em que:

$$Q_m = 1,5 \alpha_m \frac{N_{f,Ed}}{100} \quad (6.67)$$

em que:

$N_{f,Ed}$ esforço normal no banzo comprimido do elemento estabilizado ao nível da rótula plástica;

α_m de acordo com 5.3.3(1).

NOTA: Para a combinação com acções exteriores, ver também 5.3.3(5).

6.3.5.3 Verificação do “comprimento estável” de um troço de elemento

(1)B A verificação em relação à encurvadura lateral de troços entre travamentos poderá ser efectuada verificando que o seu comprimento não é superior ao “comprimento estável”.

No caso de troços de vigas uniformes com secções em I ou H em que $\frac{h}{t_f} \leq 40\epsilon$, sob a acção de um momento linearmente variável e sem compressão axial significativa, o “comprimento estável” poderá ser obtido a partir de:

$$\begin{aligned} L_{stable} &= 35 \epsilon i_z && \text{para } 0,625 \leq \psi \leq 1 \\ L_{stable} &= (60 - 40\psi) \epsilon i_z && \text{para } -1 \leq \psi \leq 0,625 \end{aligned} \quad (6.68)$$

em que:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [N/mm^2]}}$$

$$\psi = \frac{M_{Ed,min}}{M_{pl,Rd}} = \text{relação entre os momentos nas extremidades do troço.}$$

NOTA B: Para o comprimento estável de um troço, ver também o Anexo BB.3.

(2)B Quando se forma uma rótula plástica na proximidade imediata da extremidade de um esquadro, não é necessário tratar o troço de secção variável como um troço adjacente a uma rótula plástica se forem satisfeitos os seguintes critérios:

- o travamento ao nível da rótula plástica deverá estar situado a uma distância não superior a $h/2$ do lado do troço de secção variável e não do troço uniforme;
- o banzo comprimido do esquadro mantém-se elástico ao longo do seu comprimento.

NOTA B: Para mais informações, ver o Anexo o BB.3.

6.4 Elementos compostos uniformes solicitados à compressão

6.4.1 Generalidades

(1)Os elementos compostos uniformes solicitados à compressão, com extremidades articuladas e com apoios laterais, deverão ser calculados com o seguinte modelo, ver a Figura 6.7:

1. O elemento poderá ser considerado como uma coluna com uma imperfeição em arco de amplitude $e_0 = \frac{L}{500}$;
2. As deformações elásticas dos elementos transversais (diagonais ou travessas), ver a Figura 6.7, poderão ser consideradas através de uma rigidez ao esforço transversal contínua (distribuída) S_V da coluna.

NOTA: Para outras condições de extremidade poderão ser efectuadas as modificações apropriadas.

(2) O modelo de elemento composto uniforme solicitado à compressão aplica-se quando:

1. As diagonais ou as travessas são constituídas por módulos iguais de cordas paralelas;
2. O número de módulos no elemento composto é no mínimo de três.

NOTA: Esta hipótese permite considerar a estrutura como regular e distribuir de uma forma contínua as suas características discretas.

(3) O método de cálculo é aplicável a elementos compostos constituídos por estruturas com travamentos dispostos em dois planos, ver a Figura 6.8.

(4) As cordas poderão ser maciças, ou serem, elas próprias, também constituídas por estruturas travadas por diagonais ou travessas de ligação dispostas no plano perpendicular.

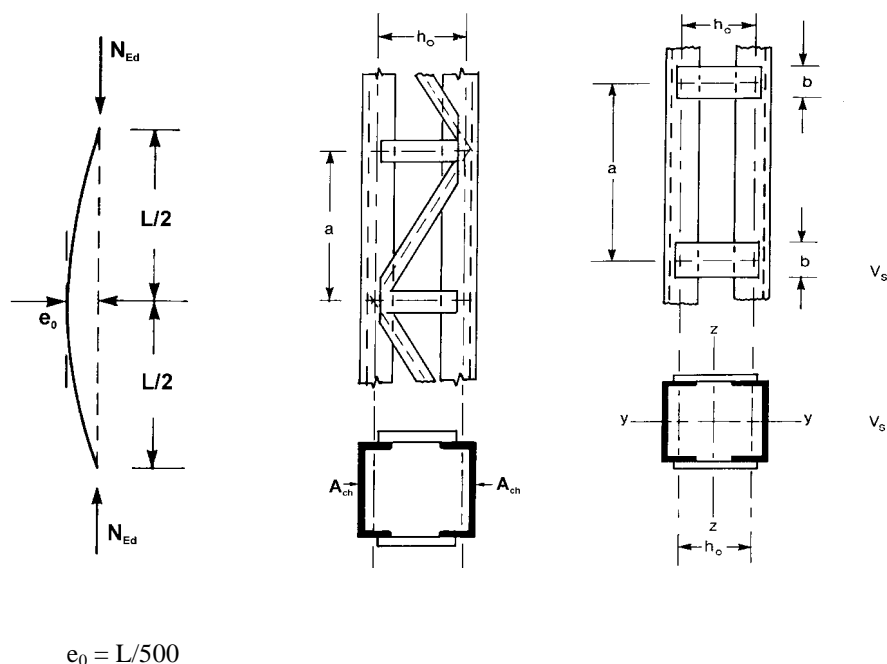


Figura 6.7 – Colunas compostas uniformes constituídas por estruturas travadas por diagonais e travessas

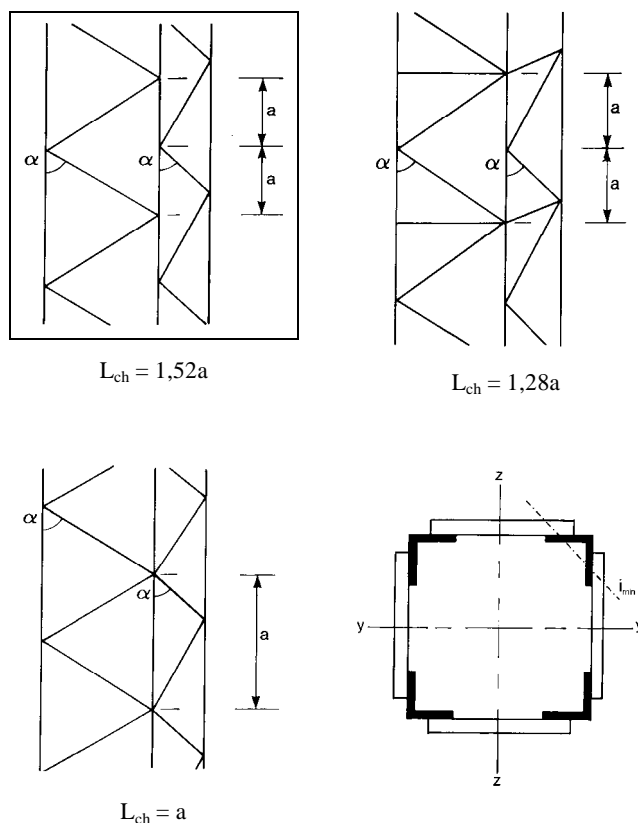


Figura 6.8 – Estruturas travadas nos quatro lados e comprimento de encurvadura L_{ch} das cordas

(5) Deverão efectuar-se as verificações das cordas para os valores de cálculo dos seus esforços normais, $N_{ch,Ed}$, resultantes do esforço de compressão N_{Ed} e dos momentos M_{Ed} actuates a meio vão do elemento composto.

(6) No caso de um elemento com duas cordas idênticas, o esforço de cálculo $N_{ch,Ed}$ deverá ser determinado a partir de:

$$N_{ch,Ed} = 0,5N_{Ed} + \frac{M_{Ed}h_0A_{ch}}{2I_{eff}} \quad (6.69)$$

em que:

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed}e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L^2} \text{ esforço crítico efectivo do elemento composto;}$$

N_{Ed} valor de cálculo do esforço de compressão no elemento composto;

M_{Ed} valor de cálculo do momento máximo actuante a meio do elemento composto considerando os efeitos de segunda ordem;

- M_{Ed}^I valor de cálculo do momento máximo actuante a meio do elemento composto sem considerar os efeitos de segunda ordem;
- h_0 distância entre os centros de gravidade das secções das cordas;
- A_{ch} área da secção transversal de uma corda;
- I_{eff} momento de inércia efectivo do elemento composto, ver 6.4.2 e 6.4.3;
- S_v rigidez ao esforço transverso dos módulos travados por diagonais e travessas, ver 6.4.2 e 6.4.3.

(7) As verificações dos elementos transversais (diagonais e travessas) dos elementos compostos de estrutura reticulada ou dos momentos e dos esforços transversos dos módulos em quadro nos elementos compostos apenas por travessas deverão ser efectuadas para o módulo de extremidade, tendo em consideração o esforço transverso no elemento composto obtido por:

$$V_{Ed} = \pi \frac{M_{Ed}}{L} \quad (6.70)$$

6.4.2 Elementos comprimidos de uma estrutura triangulada

6.4.2.1 Resistência dos componentes de elementos comprimidos de uma estrutura triangulada

(1) As cordas e as diagonais solicitadas à compressão deverão ser verificadas em relação à encurvadura.

NOTA: Os momentos secundários poderão ser desprezados.

(2) Para as cordas, a verificação em relação à encurvadura deverá ser efectuada da seguinte forma:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.71)$$

em que:

- $N_{ch,Ed}$ valor de cálculo do esforço de compressão na corda a meio do elemento composto de acordo com 6.4.1(6);
- $N_{b,Rd}$ valor de cálculo da resistência da corda à encurvadura, considerando o comprimento de encurvadura L_{ch} indicado na Figura 6.8.

(3) A rigidez ao esforço transverso S_v dos elementos transversais deverá ser obtida da Figura 6.9.

(4) O momento de inércia efectivo dos elementos compostos de uma estrutura triangulada poderá ser considerado igual a:

$$I_{eff} = 0,5h_0^2 A_{ch} \quad (6.72)$$

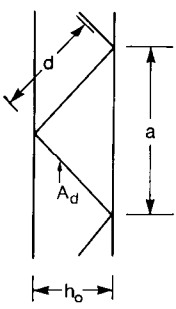
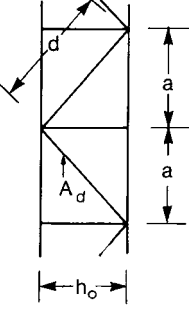
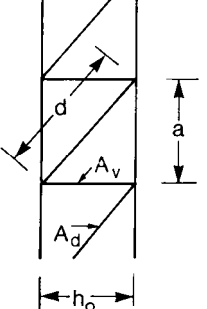
Sistema			
S_v	$\frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$
<p>n número de planos de ligação</p> <p>A_d e A_v referem-se à área da secção transversal dos elementos transversais</p>			

Figura 6.9 – Rigidez ao esforço tranverso dos travamentos de elementos compostos

6.4.2.2 Disposições construtivas

(1) As estruturas constituídas apenas por diagonais simples isoladas localizadas em duas faces opostas do elemento composto, deverão ser dispostas em correspondência uma com a outra, como representado na Figura 6.10(a), de tal modo que tenham a mesma sombra.

(2) No caso de as estruturas constituídas apenas por diagonais simples isoladas, localizadas em duas faces opostas do elemento composto, estarem dispostas em oposição uma com a outra, como representado na Figura 6.10(b), deverão ser tidos em conta no elemento composto os efeitos de torção que daí resultam.

(3) Deverão dispor-se painéis de travamento nas extremidades dos sistemas reticulados, assim como nas secções onde a triangulação é interrompida e ao nível das ligações com outros elementos.

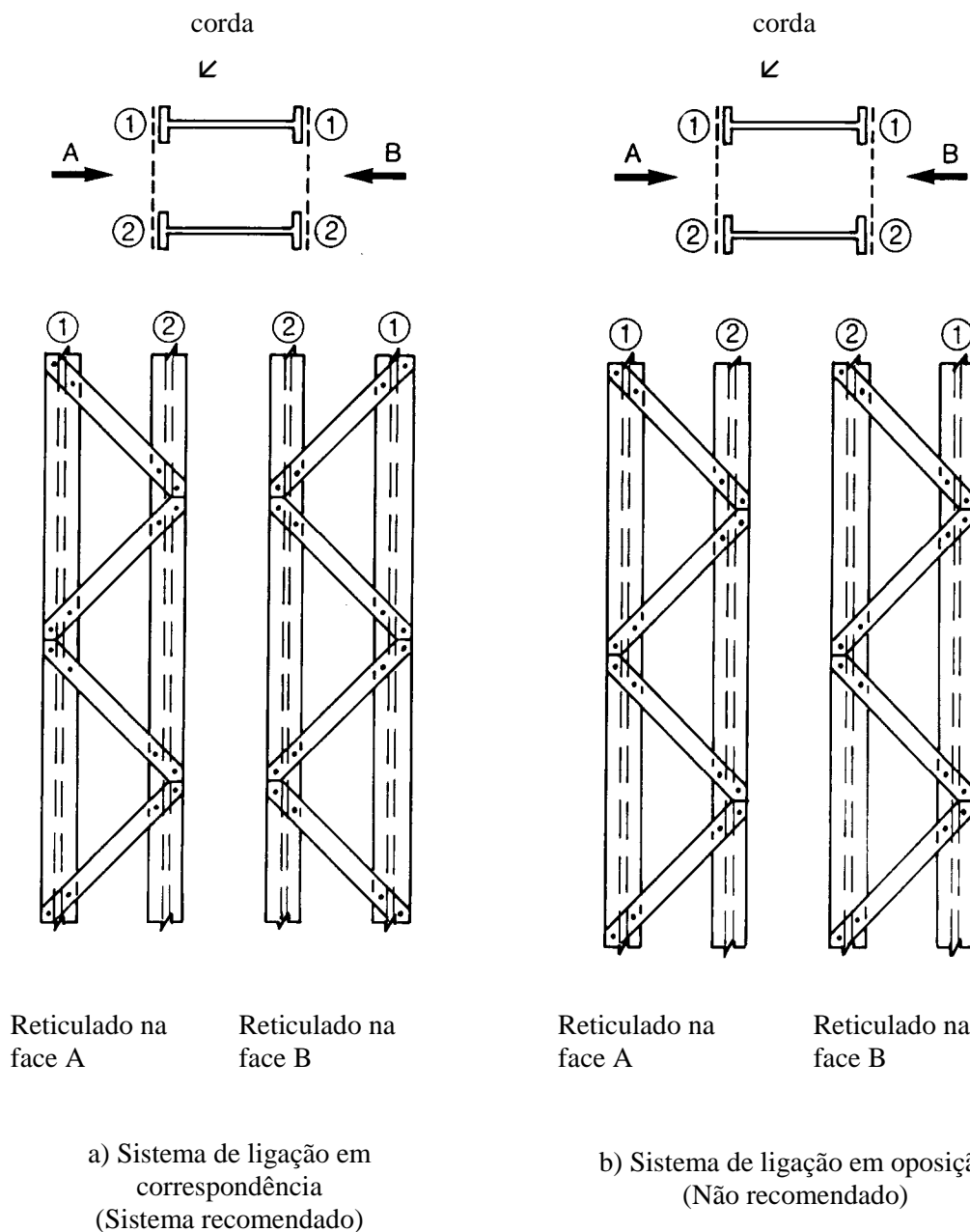


Figura 6.10 – Sistemas de diagonais simples isoladas localizados em faces opostas de um elemento composto com dois planos reticulados paralelos

6.4.3 Elementos comprimidos associados por travessas

6.4.3.1 Resistência dos componentes de elementos comprimidos associados por travessas

(1) As cordas e as travessas de ligação, assim como as ligações destas às cordas, deverão ser verificadas em relação aos momentos e a outros esforços, no painel de extremidade e a meio comprimento do elemento, como indicado na Figura 6.11.

NOTA: Como simplificação, os esforços máximos nas cordas $N_{ch,Ed}$ poderão ser combinados com o esforço transverso máximo V_{Ed} .

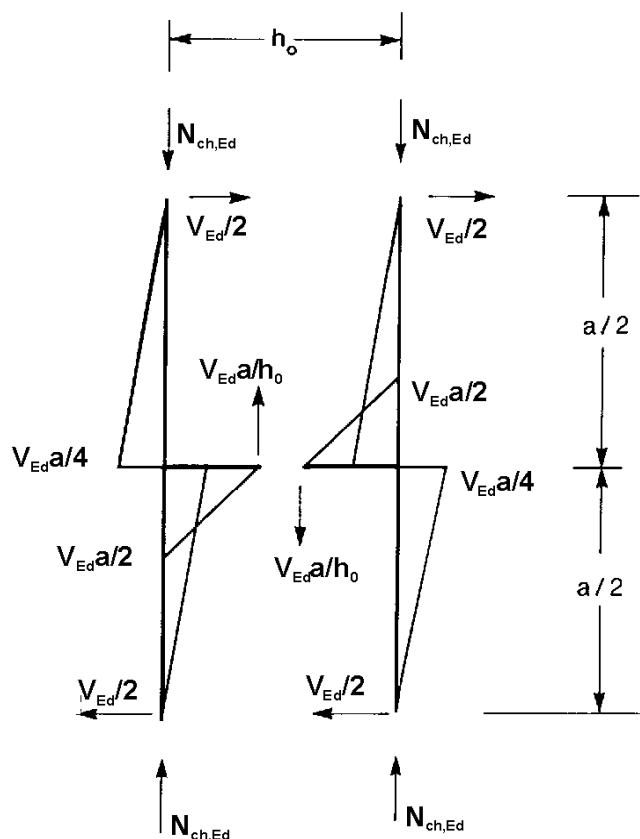


Figura 6.11 – Esforços actuantes num painel de extremidade de um elemento composto com travessas de ligação

(2) A rigidez ao esforço transverso S_v deverá ser calculada do seguinte modo:

$$S_v = \frac{24EI_{ch}}{a^2 \left[1 + \frac{2I_{ch}}{nI_b} \frac{h_0}{a} \right]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2} \quad (6.73)$$

(3) O momento de inércia efectivo dos elementos compostos com travessas de ligação poderá ser calculado por:

$$I_{eff} = 0,5h_0^2 A_{ch} + 2\mu I_{ch} \quad (6.74)$$

em que:

- I_{ch} momento de inércia de uma corda;
 I_b momento de inércia de uma travessa;
 μ factor de eficiência obtido do Quadro 6.8;
 n número de planos de travessas.

Quadro 6.8 – Factor de eficiência μ

Critério	Factor de eficiência μ
$\lambda \geq 150$	0
$75 < \lambda < 150$	$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$
$\lambda \leq 75$	1,0
em que: $\lambda = \frac{L}{i_0}$; $i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2A_{ch}}}$; $I_1 = 0,5h_0^2 A_{ch} + 2I_{ch}$	

6.4.3.2 Disposições construtivas

- (1) Deverão colocar-se travessas nas extremidades do elemento.
- (2) No caso de o elemento ter travessas dispostas em planos paralelos, as travessas situadas em cada plano deverão ser dispostas em oposição umas em relação às outras.
- (3) Também se deverão dispor travessas nos níveis intermédios em que sejam aplicadas cargas ou em que existam travamentos laterais.

6.4.4 Elementos compostos com cordas pouco afastadas

- (1) Os elementos compostos comprimidos constituídos por cordas em contacto ou pouco afastadas entre si e ligadas por forras, ver a Figura 6.12, ou cujos elementos são cantoneiras dispostas em cruz ligadas em dois planos perpendiculares por pares de travessas, ver a Figura 6.13, deverão ser verificados em relação à encurvadura como um único elemento homogéneo ignorando o efeito da rigidez ao esforço transversal ($S_V = \infty$), desde que sejam satisfeitas as condições do Quadro 6.9.

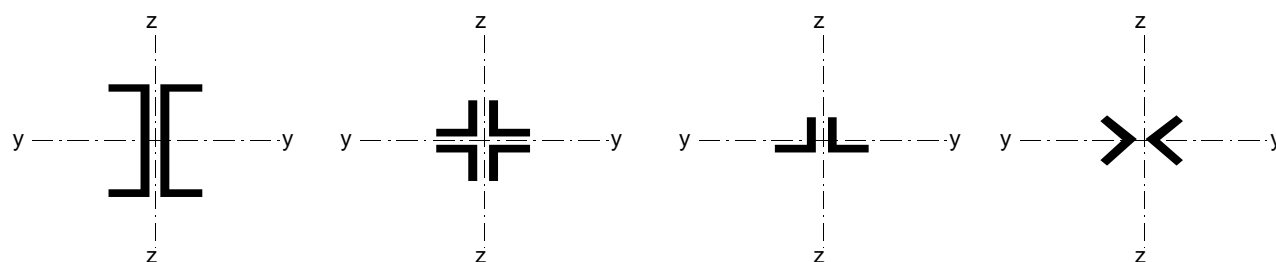


Figura 6.12 – Elementos compostos com perfis pouco afastados

Quadro 6.9 – Afastamentos máximos das ligações em elementos compostos com perfis pouco afastados ou constituídos por cantoneiras dispostas em cruz

Tipo de elemento composto	Afastamento máximo entre ligações ^{*)}
Elementos de acordo com a Figura 6.12 e ligados entre si por parafusos ou por soldadura	$15 i_{\min}$
Elementos de acordo com a Figura 6.13 ligados entre si por pares de travessas	$70 i_{\min}$
^{*)} distância entre os centros das ligações i_{\min} raio de giração mínimo de uma corda ou de uma cantoneira	

(2) Os esforços transversos a transmitir pelas travessas deverão ser determinados de acordo com 6.4.3.1(1).

(3) No caso de cantoneiras com abas desiguais, ver a Figura 6.13, a encurvadura em relação ao eixo y-y poderá ser verificada admitindo que:

$$i_y = \frac{i_0}{1,15} \quad (6.75)$$

em que:

i_0 raio de giração mínimo do elemento composto.

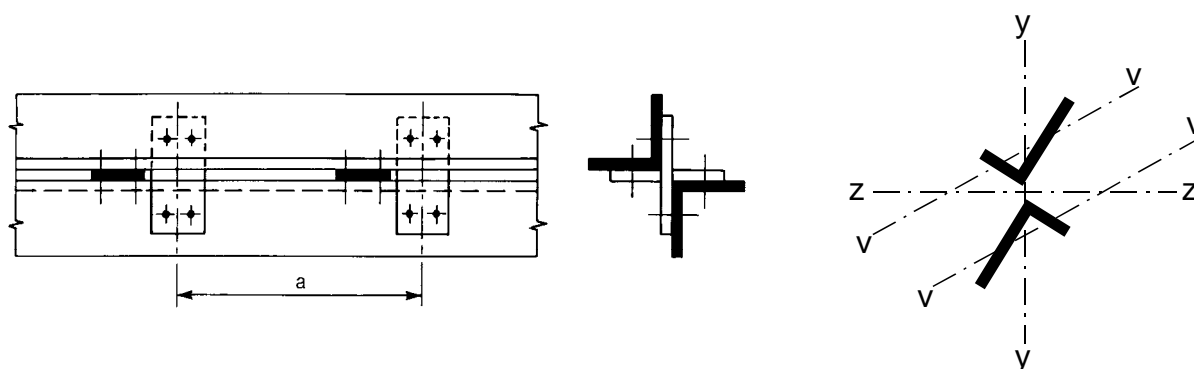


Figura 6.13 – Elementos compostos por cantoneiras dispostas em cruz

7 Estados limites de utilização

7.1 Generalidades

(1) Uma estrutura de aço deverá ser projectada e construída de forma a que sejam satisfeitos todos os critérios de utilização relevantes.

(2) Os requisitos gerais relativos aos estados limites de utilização são indicados na secção 3.4 da EN 1990.

(3) Para um dado projecto, deverão ser especificados todos os estados limites de utilização, assim como os modelos de análise e os carregamentos a eles associados.

(4) Quando é utilizada uma análise global plástica na verificação dos estados limites últimos, poderão ocorrer redistribuições plásticas dos esforços para os estados limites de utilização. Neste caso, os seus efeitos deverão ser considerados.

7.2 Estados limites de utilização para os edifícios

7.2.1 Deslocamentos verticais

(1)B Considerando como referência a EN 1990 – Anexo A1.4, os limites para os deslocamentos verticais definidos na Figura A1.1 deverão ser especificados para cada projecto e acordados com o dono de obra.

NOTA B: O Anexo Nacional poderá especificar esses limites.

7.2.2 Deslocamentos horizontais

(1)B Considerando como referência a EN 1990 – Anexo A1.4, os limites para os deslocamentos horizontais definidos na Figura A1.2 deverão ser especificados para cada projecto e acordados com o dono de obra.

NOTA B: O Anexo Nacional poderá especificar esses limites.

7.2.3 Efeitos dinâmicos

(1)B Considerando como referência a EN 1990 – Anexo A1.4.4, as vibrações das estruturas acessíveis ao público deverão ser limitadas de forma a evitar um desconforto significativo para os utentes, e os seus limites deverão ser especificados para cada projecto e acordados com o dono de obra.

NOTA B: O Anexo Nacional poderá especificar limites para as vibrações dos pavimentos.

Anexo A^{*)}
(informativo)

Método 1: Factores de interacção k_{ij} para a expressão de interacção indicada em 6.3.3(4)

Quadro A.1 – Factores de interacção k_{ij} (6.3.3(4))

Factores de interacção	Hipóteses de cálculo	
	Propriedades elásticas das secções transversais Classe 3, Classe 4	Propriedades plásticas das secções transversais Classe 1, Classe 2
k_{yy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$
Termos auxiliares:		
$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ <p>com $b_{LT} = 0,5 a_{LT} \bar{\lambda}_0^{-2} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$</p>	

(continua)

*) De acordo com o disposto no Anexo Nacional NA, este Anexo tem, em Portugal, um carácter normativo (nota nacional).

Quadro A.1 – Factores de interacção k_{ij} (6.3.3(4)) (continuação)

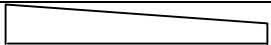

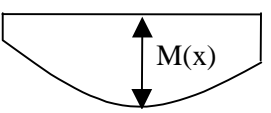
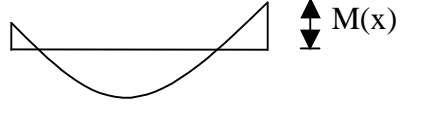
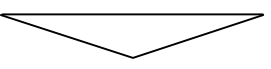
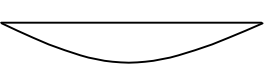
$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$ $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5$ $w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$ $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M0}}$ $C_{my} \text{ ver o Quadro A.2}$ $a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} \geq 0$	$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ <p>com $c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$</p> $C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ <p>com $d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$</p> $C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right] n_{pl} \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ <p>com $e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$</p>
$\bar{\lambda}_{max} = \max \left\{ \begin{array}{l} \bar{\lambda}_y \\ \bar{\lambda}_z \end{array} \right.$ <p>$\bar{\lambda}_0$ = esbelteza normalizada relativa à encurvadura lateral para o caso de momento flector uniforme, ou seja, $\psi_y = 1,0$ no Quadro A.2</p> <p>$\bar{\lambda}_{LT}$ = esbelteza normalizada relativa à encurvadura lateral</p> <p>Se $\bar{\lambda}_0 \leq 0,2 \sqrt{C_1} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)}$:</p> $C_{my} = C_{my,0}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = 1,0$	

(continua)

Quadro A.1 – Factores de interacção k_{ij} (6.3.3(4)) (conclusão)

$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}$	
Se	$\bar{\lambda}_0 > 0,2\sqrt{C_1} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)} : C_{mz} = C_{mz,0}$
	$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1$
C_1	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos e as condições de apoio nas extremidades; C_1 poderá tomar-se igual a k_c^{-2} , em que k_c é obtido do Quadro 6.6
$C_{mi,0}$	ver o Quadro A.2
$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}}$	para as secções transversais das Classes 1, 2 e 3
$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}}$	para as secções transversais da Classe 4
$N_{cr,y}$	= esforço normal crítico de encurvadura elástica por flexão em torno do eixo y-y
$N_{cr,z}$	= esforço normal crítico de encurvadura elástica por flexão em torno do eixo z-z
$N_{cr,T}$	= esforço normal crítico de encurvadura elástica por torção
I_T	= constante de torção de St. Venant
I_y	= momento de inércia em relação ao eixo y-y

Quadro A.2 – Coeficientes de momento uniforme equivalente $C_{mi,0}$

Diagrama de momentos	$C_{mi,0}$
 M_1  ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
  $M_{i,Ed}(x)$ valor máximo do momento $M_{y,Ed}$ ou $M_{z,Ed}$ correspondente a uma análise de primeira ordem $ \delta_x $ flecha máxima ao longo do elemento	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI_i \delta_x }{L^2 M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Anexo B^{*)}

(informativo)

Método 2: Factores de interacção k_{ij} para a expressão de interacção indicada em 6.3.3(4)

Quadro B.1 – Factores de interacção k_{ij} para elementos não susceptíveis à deformação por torção


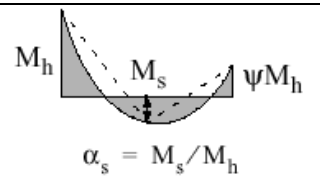
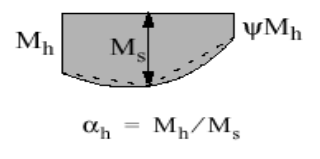
Factores de interacção	Tipo de secções	Hipóteses de cálculo	
		Propriedades elásticas das secções transversais Classe 3, Classe 4	Propriedades plásticas das secções transversais Classe 1, Classe 2
k_{yy}	Secções em I Secções tubulares rectangulares	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	Secções em I Secções tubulares rectangulares	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	Secções em I Secções tubulares rectangulares	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	Secções em I	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	Secções tubulares rectangulares		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
Para secções em I e H e para secções tubulares rectangulares submetidas a compressão axial e a flexão recta $M_{y,Ed}$, o factor k_{zy} poderá considerar-se $k_{zy} = 0$.			

^{*)} De acordo com o disposto no Anexo Nacional NA, este Anexo tem, em Portugal, um carácter normativo (nota nacional).

Quadro B.2 – Factores de interacção k_{ij} para elementos susceptíveis à deformação por torção

Factores de interacção	Hipóteses de cálculo	
	Propriedades elásticas das secções transversais Classe 3, Classe 4	Propriedades plásticas das secções transversais Classe 1, Classe 2
k_{yy}	k_{yy} do Quadro B.1	k_{yy} do Quadro B.1
k_{yz}	k_{yz} do Quadro B.1	k_{yz} do Quadro B.1
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ <p>para $\bar{\lambda}_z < 0,4$:</p> $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} do Quadro B.1	k_{zz} do Quadro B.1

Quadro B.3 – Coeficientes de momento uniforme equivalente C_m dos Quadros B.1 e B.2

Diagrama de momentos	Domínio de aplicação		C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}	
			Carga uniforme	Carga concentrada
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s/M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)$
Em elementos com modos de encurvadura associados a deslocamentos laterais, o coeficiente de momento uniforme equivalente deverá tomar-se igual a $C_{my} = 0,9$ ou $C_{mz} = 0,9$, respectivamente.				
C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} deverão ser obtidos de acordo com o diagrama dos momentos flectores actuantes entre as secções de travamento, de acordo com:				
coeficiente de momento	eixo de flexão	travamento na direcção		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mz}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

Anexo AB

(informativo)

Disposições de projecto adicionais

AB.1 Análise estrutural tomando em consideração a não linearidade material

(1)B No caso de materiais com comportamento não linear, os efeitos das acções numa estrutura poderão ser determinados através de uma abordagem que envolva a aplicação incremental dos valores de cálculo das acções, a considerar para a situação relevante de projecto.

(2)B Nesta abordagem incremental, os valores de cálculo de cada acção permanente ou variável deverão ser aumentados de forma proporcional.

AB.2 Disposições simplificadas para o projecto de vigas de pavimento contínuas

(1)B No caso de vigas contínuas de edifícios ligadas a lajes, sem troços em consola e submetidas predominantemente a cargas uniformemente distribuídas, é suficiente considerar apenas os seguintes casos de carregamento:

- a) aplicar a totalidade dos valores de cálculo das cargas permanentes e variáveis ($\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k$) em vãos alternados, ficando os restantes vãos submetidos apenas aos valores de cálculo das cargas permanentes $\gamma_G G_k$;
- b) aplicar a totalidade dos valores de cálculo das cargas permanentes e variáveis ($\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k$) em quaisquer dois vãos adjacentes, ficando os restantes vãos submetidos apenas aos valores de cálculo das cargas permanentes $\gamma_G G_k$.

NOTA 1: a) refere-se aos momentos positivos, b) refere-se aos momentos negativos.

NOTA 2: O presente Anexo destina-se a ser transferido para a EN 1990 numa fase posterior.

Anexo BB

(informativo)

Encurvadura de componentes de estruturas de edifícios

BB.1 Encurvadura por flexão de elementos de estruturas trianguladas e treliçadas

BB.1.1 Generalidades

(1)B No caso das cordas, em geral, e da encurvadura para fora do plano dos elementos de alma, o comprimento de encurvadura L_{cr} poderá tomar-se igual ao comprimento real L , ver BB.1.3(1)B, excepto se for possível justificar um valor inferior através de uma análise da estrutura.

(2)B O comprimento de encurvadura L_{cr} de uma corda com secção em I ou H poderá tomar-se igual a $0,9L$, para a encurvadura no plano, e a $1,0L$, para a encurvadura fora do plano, excepto se for possível justificar valores inferiores através de uma análise da estrutura.

(3)B A verificação de segurança dos elementos de alma, em relação à encurvadura no plano, poderá ser efectuada adoptando um comprimento de encurvadura inferior ao comprimento real, desde que as cordas forneçam restrições adequadas às suas secções extremas e as ligações de extremidade assegurem um grau de encastramento adequado (no caso das ligações aparafusadas, pelo menos 2 parafusos).

(4)B Nestas condições, em estruturas trianguladas correntes os comprimentos de encurvadura L_{cr} dos elementos de alma relativos à encurvadura no plano poderão tomar-se iguais a $0,9L$, excepto no caso das cantoneiras, ver BB.1.2.

BB.1.2 Cantoneiras utilizadas como elementos de alma

(1)B Desde que as cordas forneçam restrições adequadas às secções extremas dos elementos de alma formados por cantoneiras e as ligações de extremidade desses elementos assegurem um grau de encastramento adequado (no caso das ligações aparafusadas, pelo menos 2 parafusos), as excentricidades poderão ser desprezadas e poderá tomar-se em consideração o encastramento das secções extremas das cantoneiras utilizadas como elementos da alma comprimidos. A esbelteza normalizada efectiva $\bar{\lambda}_{eff}$ poderá ser obtida da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_{eff,v} &= 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v && \text{para a encurvadura por flexão em torno do eixo v-v} \\ \bar{\lambda}_{eff,y} &= 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_y && \text{para a encurvadura por flexão em torno do eixo y-y} \\ \bar{\lambda}_{eff,z} &= 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_z && \text{para a encurvadura por flexão em torno do eixo z-z}\end{aligned}\tag{BB.1}$$

em que:

$\bar{\lambda}$ definido em 6.3.1.2.

(2)B Quando se utiliza apenas um parafuso nas ligações das extremidades das cantoneiras utilizadas como elementos de alma, deverá tomar-se em consideração a excentricidade, através de 6.2.9, e o comprimento de encurvadura L_{cr} deverá tomar-se igual ao comprimento real do elemento L .

BB.1.3 Elementos com secção tubular

(1)B O comprimento de encurvadura L_{cr} de uma corda com secção tubular poderá tomar-se igual a $0,9L$ tanto para a encurvadura no plano como para a encurvadura fora do plano, em que L é o comprimento real teórico no plano relevante considerado. O comprimento real no plano é a distância entre as ligações. O comprimento real fora do plano é a distância entre os apoios laterais, excepto se for possível justificar um valor inferior através de uma análise da estrutura.

(2)B O comprimento de encurvadura L_{cr} de uma diagonal com secção tubular (elemento de alma) e ligações aparafusadas poderá tomar-se igual a $1,0L$ tanto para a encurvadura no plano como fora do plano.

(3)B O comprimento de encurvadura L_{cr} de uma diagonal com secção tubular sem entalhe ou achatamento, e cuja secção extrema está soldada a cordas também de secção tubular, ao longo do seu perímetro, poderá, em geral, tomar-se igual a $0,75L$ tanto para a encurvadura no plano como fora do plano. Comprimentos de encurvadura inferiores poderão ser utilizados com base em ensaios ou cálculos. Neste caso, o comprimento de encurvadura da corda não poderá ser reduzido.

NOTA: O Anexo Nacional poderá incluir mais informações sobre os comprimentos de encurvadura.

BB.2 Travamentos contínuos

BB.2.1 Travamentos laterais contínuos

(1)B Se, de acordo com a EN 1993-1-3, uma chapa perfilada trapezoidal estiver ligada a uma viga e for satisfeita a condição (BB.2), a viga poderá admitir-se travada lateralmente, no plano da chapa, nas ligações.

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_T + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2} \quad (\text{BB.2})$$

em que:

S rigidez de esforço transversal (por unidade de comprimento da viga) proporcionada pelas chapas transversais à viga, relativa à sua deformação no plano da chapa a ser ligada à viga na base de cada nervura;

I_w constante de empenamento;

I_T constante de torção de St. Venant;

I_z momento de menor inércia da secção;

L comprimento da viga;

h altura da viga.

Se a chapa estiver ligada à viga apenas em nervuras alternadas, S deverá ser substituído por $0,20S$.

NOTA: A expressão (BB.2) poderá também utilizar-se para avaliar a estabilidade lateral dos banzos de vigas ligados a componentes de outros tipos de revestimento que não sejam chapas perfiladas trapezoidais, desde que as respectivas ligações sejam devidamente projectadas.

BB.2.2 Travamentos à torção contínuos


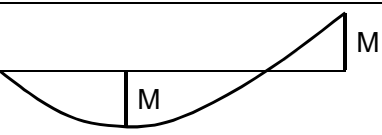
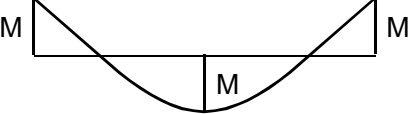


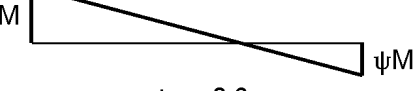
(1)B Uma viga poderá considerar-se suficientemente travada em relação às deformações por torção se:

$$C_{\vartheta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{EI_z} K_{\vartheta} K_{\vartheta} \quad (\text{BB.3})$$

em que:

- $C_{\vartheta,k}$ rigidez de rotação (por unidade de comprimento da viga) conferida à viga pelo elemento contínuo de travamento (por exemplo, uma estrutura de cobertura) e pelas ligações;
- K_v 0,35 para a análise elástica;
- K_v 1,00 para a análise plástica;
- K_{ϑ} coeficiente para ter em conta a distribuição dos momentos flectores, ver o Quadro BB.1, e o tipo de travamento;
- $M_{pl,k}$ valor característico do momento plástico da viga.

Quadro BB.1 – Coeficiente K_{ϑ} para ter em conta a distribuição dos momentos e o tipo de travamento

Caso	Distribuição dos momentos	Sem travamento à translação	Com travamento à translação
1		4,0	0
2a		3,5	0,12
2b			0,23
3		2,8	0
4		1,6	1,0
5	 $\psi \leq -0,3$	1,0	0,7

(2)B A rigidez de rotação conferida à viga pelo elemento contínuo de travamento poderá ser calculada através de:

$$\frac{1}{C_{\vartheta,k}} = \frac{1}{C_{\vartheta R,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta C,k}} + \frac{1}{C_{\vartheta D,k}} \quad (\text{BB.4})$$

em que:

- $C_{\vartheta R,k}$ rigidez de rotação (por unidade de comprimento da viga) conferida à viga pelo elemento contínuo de travamento, admitindo que a ligação é rígida;
- $C_{\vartheta C,k}$ rigidez de rotação (por unidade de comprimento da viga) da ligação entre a viga e o elemento contínuo de travamento;

$C_{\vartheta D,k}$ rigidez de rotação (por unidade de comprimento da viga) obtido através de uma análise das deformações provocadas pela distorção das secções transversais da viga, em que o banzo comprimido se encontra livre; no caso de o banzo comprimido estar ligado ou quando as deformações provocadas pela distorção das secções puderem ser desprezadas (por exemplo, no caso dos perfis laminados correntes), toma-se $C_{\vartheta D,k} = \infty$.

NOTA: Para mais informações, ver a EN 1993-1-3.

BB.3 Comprimentos estáveis, em relação à encurvadura fora do plano, de troços de elementos contendo rótulas plásticas

BB.3.1 Elementos uniformes constituídos por perfis laminados ou por perfis soldados em I de dimensões equivalentes

BB.3.1.1 Comprimentos estáveis entre travamentos laterais adjacentes

(1)B Os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados sempre que o comprimento L do troço compreendido entre a secção travada onde se forma uma rótula plástica e o travamento lateral adjacente não seja superior a L_m , onde:

$$L_m = \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_T} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (\text{BB.5})$$

em que:

- N_{Ed} valor de cálculo do esforço axial de compressão [N] que actua no elemento;
- A área da secção transversal [mm²] do elemento;
- $W_{pl,y}$ módulo de flexão plástico da secção do elemento;
- I_T constante de torção de St. Venant da secção do elemento;
- f_y tensão de cedência [N/mm²];
- C_1 coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos e as condições de apoio nas extremidades; C_1 poderá tomar-se igual a k_c^{-2} , em que k_c é obtido do Quadro 6.6;

desde que o elemento esteja travado na secção onde se forma a rótula plástica, como estipulado em 6.3.5, e a outra extremidade do troço esteja travada:

- ou através de um travamento lateral do banzo comprimido, quando um dos banzos se encontra comprimido ao longo de todo o comprimento do troço;
- ou através de um travamento à torção;
- ou através de um travamento lateral nessa extremidade do troço combinado com um travamento à torção situado a uma distância que satisfaça os valores estipulados para L_s ;

ver a Figura BB.1, a Figura BB.2 e a Figura BB.3.

NOTA: Em geral, L_s é superior a L_m .

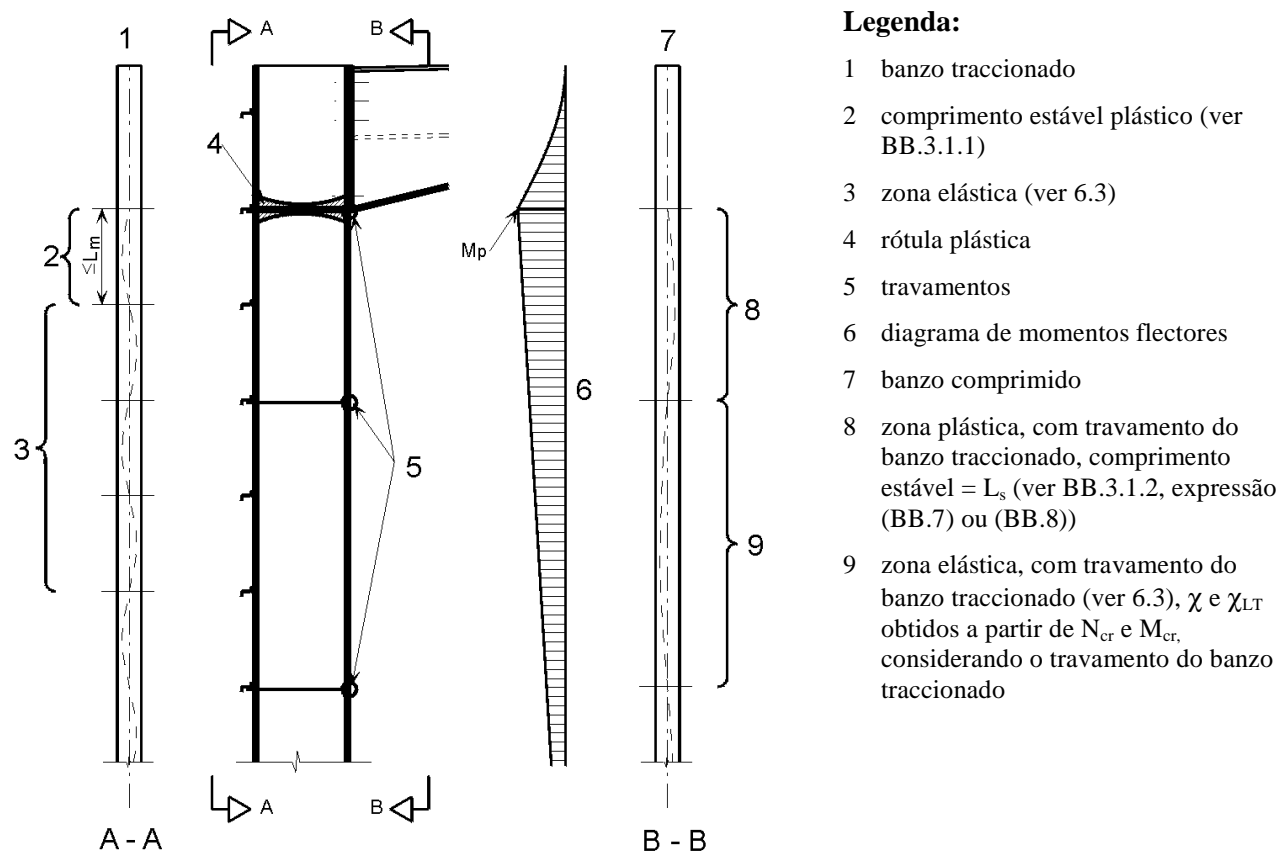
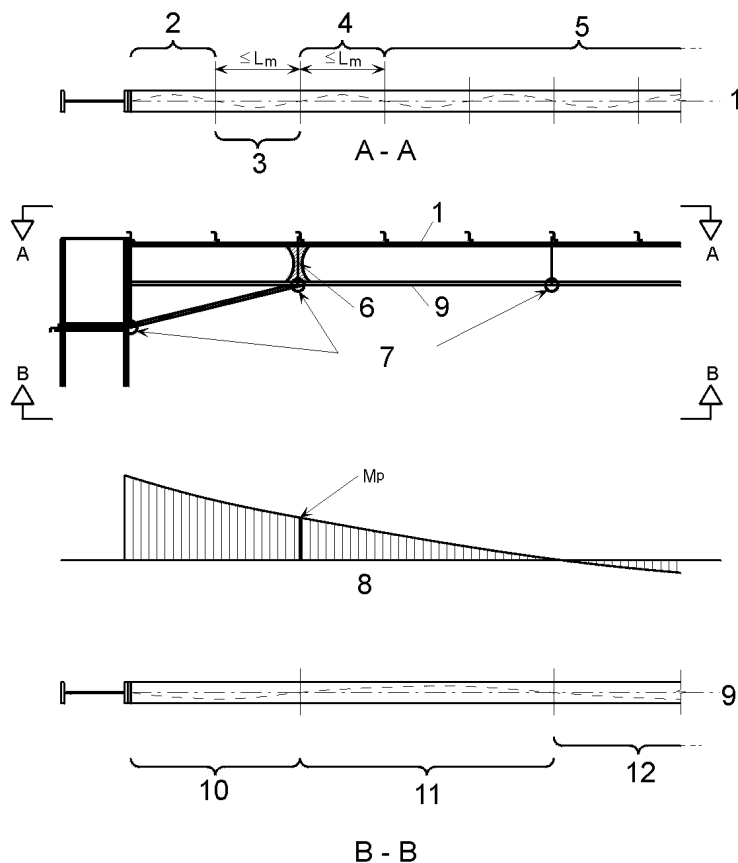


Figura BB.1 – Verificações num elemento sem esquadro de reforço



Legenda:

- 1 banzo traccionado
- 2 zona elástica (ver 6.3)
- 3 comprimento estável plástico (ver BB.3.2.1) ou elástico (ver 6.3.5.3(2)B)
- 4 comprimento estável plástico (ver BB.3.1.1)
- 5 zona elástica (ver 6.3)
- 6 rótula plástica
- 7 travamentos
- 8 diagrama de momentos flectores
- 9 banzo comprimido
- 10 comprimento estável plástico (ver BB.3.2) ou elástico (ver 6.3.5.3(2)B)
- 11 comprimento estável plástico (ver BB.3.1.2)
- 12 zona elástica (ver 6.3), χ e χ_{LT} obtidos a partir de N_{cr} e M_{cr} considerando o travamento do banzo traccionado

Figura BB.2 – Verificações num elemento com um esquadro de reforço envolvendo três banzos

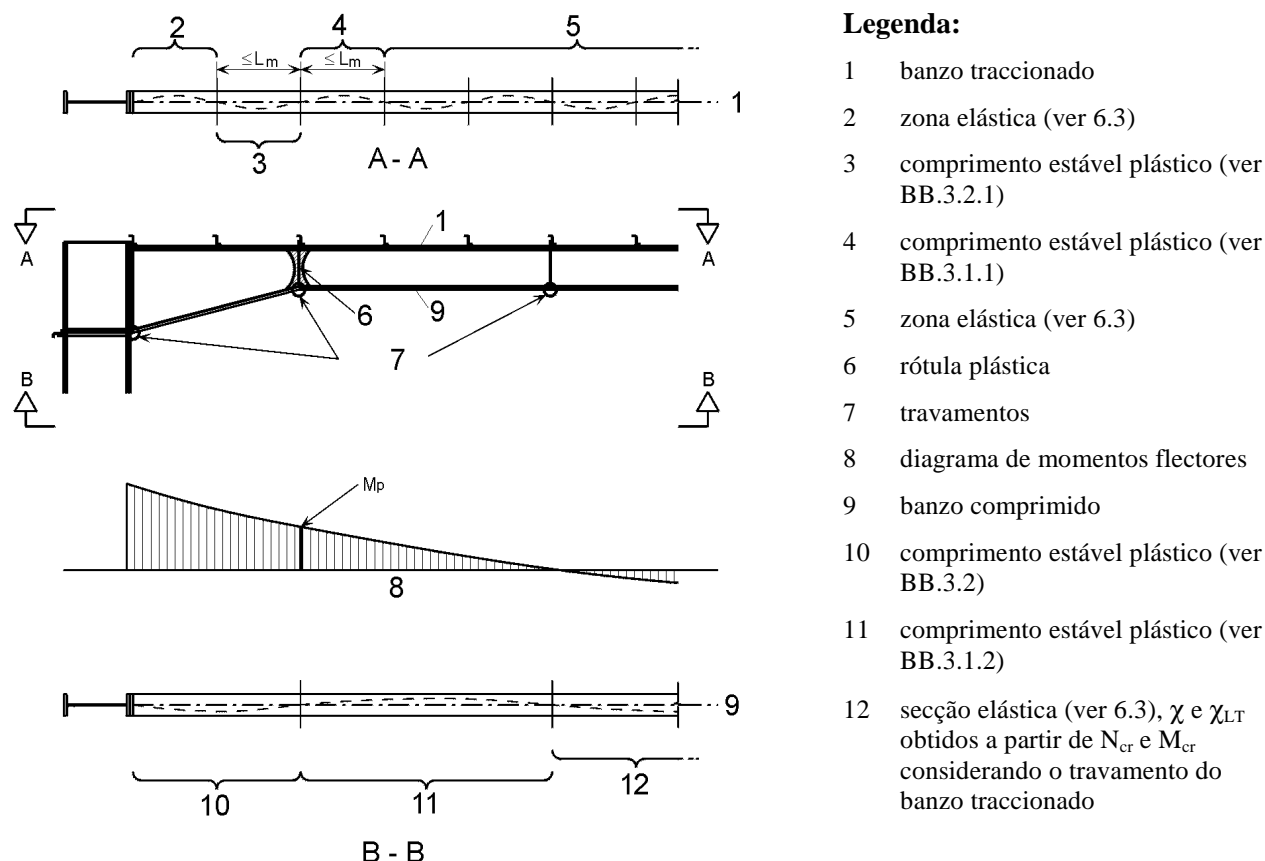


Figura BB.3 – Verificações num elemento com um esquadro de reforço de dois banzos

BB.3.1.2 Comprimento estável entre travamentos em relação à torção

(1)B Os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados sempre que o comprimento L do troço de elemento compreendido entre a secção travada onde se forma uma rótula plástica e o travamento adjacente à torção, submetido a um diagrama de momentos flectores constante, não seja superior a L_k , desde que:

- o elemento esteja travado na secção onde se forma a rótula plástica, conforme estipulado em 6.3.5; e
- existam um ou vários travamentos laterais intermédios entre os travamentos à torção com afastamentos que satisfaçam os valores estipulados para L_m , ver BB.3.1.1, em que:

$$L_k = \frac{\left(5,4 + \frac{600f_y}{E}\right) \left(\frac{h}{t_f}\right) i_z}{\sqrt{5,4 \left(\frac{f_y}{E}\right) \left(\frac{h}{t_f}\right)^2 - 1}} \quad (\text{BB.6})$$

(2)B Os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados sempre que o comprimento L do troço de elemento compreendido entre a secção travada onde se forma uma rótula plástica e o travamento adjacente em relação à torção e submetido a um diagrama de momentos flectores linear e a compressão axial, não seja superior a L_s , desde que:

- o elemento esteja travado na secção onde se forma a rótula plástica, conforme estipulado em 6.3.5; e

- existam um ou vários travamentos laterais intermédios entre os travamentos à torção com afastamentos que satisfaçam os valores estipulados para L_m , ver BB.3.1.1, em que:

$$L_s = \sqrt{C_m} L_k \left(\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{N,y,Rk} + aN_{Ed}} \right) \quad (BB.7)$$

C_m coeficiente para ter em conta a variação linear do momento, ver BB.3.3.1;

a distância entre o centro de gravidade do elemento que contém a rótula plástica e o centro de gravidade dos elementos de travamento;

$M_{pl,y,Rk}$ valor característico do momento plástico da secção transversal relativo à flexão em torno do eixo y-y;

$M_{N,y,Rk}$ valor característico do momento plástico da secção transversal relativo à flexão em torno do eixo y-y reduzida pela interacção com o esforço normal N_{Ed} .

(3)B Os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados sempre que o comprimento L de um troço de elemento compreendido entre a secção travada onde se forma uma rótula plástica e o travamento adjacente à torção, submetido a um diagrama de momentos flectores variável não linear e a compressão axial, não seja superior a L_s , desde que:

- o elemento esteja travado na secção onde se forma a rótula plástica, conforme estipulado em 6.3.5; e
- existam um ou vários travamentos laterais intermédios entre os elementos de travamento à torção com afastamentos que satisfaçam os valores estipulados para L_m , ver BB.3.1.1, em que:

$$L_s = \sqrt{C_n} L_k \quad (BB.8)$$

C_n coeficiente para ter em conta a variação não linear do momento, ver BB.3.3.2;

ver a Figura BB.1, a Figura BB.2 e a Figura BB.3.

BB.3.2 Elementos laminados ou soldados equivalentes de secção em I com esquadro de reforço ou secção variável

BB.3.2.1 Comprimento estável entre travamentos laterais adjacentes

(1)B Os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados sempre que o comprimento L do troço de um elemento compreendido entre a secção travada onde se forma uma rótula plástica e o travamento lateral adjacente não seja superior a L_m , onde:

- para esquadros de reforço envolvendo três banzos (ver a Figura BB.2):

$$L_m = \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_T} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (BB.9)$$

- para esquadros de reforço envolvendo dois banzos (ver a Figura BB.3):

$$L_m = 0,85 \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_T} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (BB.10)$$

em que:

N_{Ed} valor de cálculo do esforço de compressão [N] que actua no elemento;

$\frac{W_{pl,y}^2}{AI_T}$	valor máximo no troço;
A	área da secção transversal do elemento [mm ²] onde $\frac{W_{pl,y}^2}{AI_T}$ é máximo;
C ₁	coeficiente para ter em conta a distribuição de momentos e as condições de apoio nas extremidades; C ₁ poderá tomar-se igual a k _c ⁻² , em que k _c é obtido do Quadro 6.6;
W _{pl,y}	módulo plástico de flexão da secção do elemento;
I _T	constante de torção de St. Venant da secção do elemento;
f _y	tensão de cedência [N/mm ²];
i _z	valor mínimo do raio de giração da secção no troço;

desde que o elemento esteja travado onde se forma a rótula plástica, conforme estipulado em 6.3.5, e a outra extremidade do troço esteja travada:

- ou através de um travamento lateral do banzo comprimido, quando um dos banzos se encontra comprimido ao longo de todo o comprimento do troço;
- ou através de um travamento à torção;
- ou através de um travamento lateral nessa extremidade do troço combinado com um elemento de travamento à torção situado a uma distância que satisfaça os valores estipulados para L_s.

BB.3.2.2 Comprimento estável entre travamentos à torção

(1)B No caso de elementos de secção variável com banzos uniformes submetidos a diagramas de momentos flectores variáveis linearmente ou não, e a compressão axial, os efeitos da encurvadura lateral poderão ser ignorados sempre que o comprimento do troço compreendido entre a secção travada onde se forma uma rótula plástica e o travamento adjacente à torção não seja superior a L_s, desde que:

- o elemento esteja travado na secção onde se forma a rótula plástica, conforme estipulado em 6.3.5; e
- existam um ou vários travamentos laterais intermédios entre os travamentos à torção com afastamentos que satisfaçam os valores estipulados para L_m, ver BB.3.2.1;

em que:

- para esquadros de reforço envolvendo três banzos (ver a Figura BB.2):

$$L_s = \frac{\sqrt{C_n} L_k}{c} \quad (\text{BB.11})$$

- para esquadros de reforço envolvendo dois banzos (ver a Figura BB.3):

$$L_s = 0,85 \frac{\sqrt{C_n} L_k}{c} \quad (\text{BB.12})$$

em que:

L _k	comprimento determinado para um elemento uniforme com secção transversal igual à menor secção do elemento considerado, ver BB.3.1.2;
C _n	ver BB.3.3.2;
c	factor de variação da secção definido em BB.3.3.3.

BB.3.3 Coeficientes de correcção para diagramas de momentos flectores variáveis que actuam em elementos travados lateralmente ao longo do banzo traccionado

BB.3.3.1 Diagramas de momentos flectores lineares

(1)B O coeficiente de correcção C_m poderá ser determinado a partir de:

$$C_m = \frac{1}{B_0 + B_1\beta_t + B_2\beta_t^2} \quad (\text{BB.13})$$

em que:

$$B_0 = \frac{1+10\eta}{1+20\eta}$$

$$B_1 = \frac{5\sqrt{\eta}}{\pi + 10\sqrt{\eta}}$$

$$B_2 = \frac{0,5}{1 + \pi\sqrt{\eta}} - \frac{0,5}{1 + 20\eta}$$

$$\eta = \frac{N_{crE}}{N_{crT}}$$

$$N_{crE} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_t^2}$$

L_t distância entre os travamentos à torção;

$N_{crT} = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 EI_z a^2}{L_t^2} + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} + GI_T \right)$ carga crítica de encurvadura elástica por torção, de um elemento com secção em I e comprimento igual ao espaçamento L_t entre as secções travadas em ambos os banzos, e com travamento lateral intermédio efectivo do banzo traccionado;

$$i_s^2 = i_y^2 + i_z^2 + a^2$$

em que:

a distância entre o centro de gravidade do elemento travado e o centro de gravidade dos elementos de travamento, tal como no caso de madres que travam travessas;

β_t quociente entre o menor e o maior momento de extremidade, tomados com os seus valores algébricos. Os momentos que provocam compressão no banzo não travado deverão ser considerados positivos. Se o quociente for inferior a - 1,0, deverá tomar-se para β_t o valor - 1,0, ver a Figura BB.4.

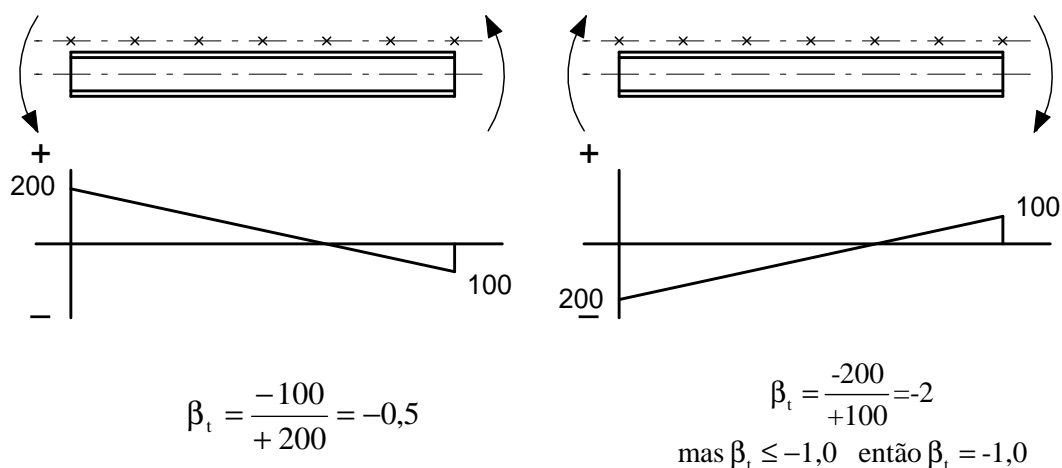


Figura BB.4 – Valor de β_t

BB.3.3.2 Diagramas de momentos flectores não lineares

(1)B O coeficiente de correcção C_n poderá ser determinado a partir de:

$$C_n = \frac{12}{[R_1 + 3R_2 + 4R_3 + 3R_4 + R_5 + 2(R_S - R_E)]} \quad (\text{BB.14})$$

onde R_1 a R_5 são os valores de R fornecidos em (2)B nas secções de extremidade, quartos de vão e meio vão, ver a Figura BB.5, e deverão apenas ser considerados valores positivos de R .

Para além disso, só deverão considerar-se também valores positivos de $(R_S - R_E)$, onde:

- R_E maior dos valores R_1 ou R_5 ;
- R_S valor máximo de R ao longo do comprimento L_y .

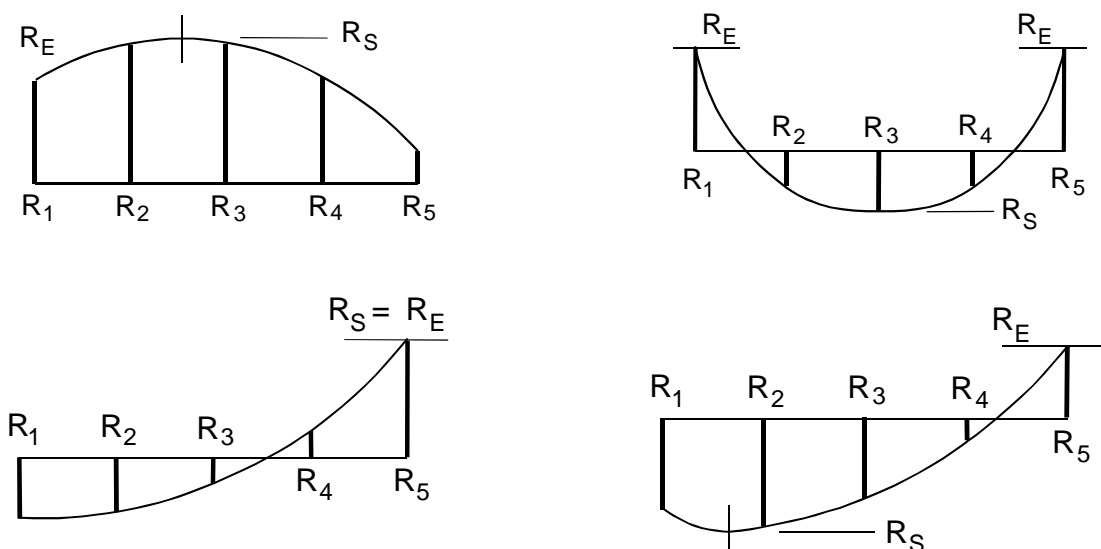


Figura BB.5 – Valores de momentos

(2)B O valor de R deverá ser obtido a partir de:

$$R = \frac{M_{y,Ed} + a N_{Ed}}{f_y W_{pl,y}} \quad (\text{BB.15})$$

em que:

a distância entre o centro de gravidade do elemento travado e o centro de gravidade dos elementos de travamento, tal como no caso de madres que travam travessas.

BB.3.3.3 Factor de variação da altura da secção transversal

(1)B No caso de elementos de secção variável com banzos uniformes com $h \geq 1,2b$ e $h/t_f \geq 20$, o factor de variação da altura da secção transversal c deverá ser obtido da seguinte forma:

– para elementos ou troços de secção variável, ver a Figura BB.6(a):

$$c = 1 + \frac{3}{\left(\frac{h}{t_f} - 9\right)} \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} - 1\right)^{2/3} \quad (\text{BB.16})$$

– para elementos ou troços com esquadro de reforço, ver as Figuras BB.6(b) e BB.6(c):

$$c = 1 + \frac{3}{\left(\frac{h}{t_f} - 9\right)} \left(\frac{h_h}{h_s}\right)^{2/3} \sqrt{\frac{L_h}{L_y}} \quad (\text{BB.17})$$

em que:

h_h altura adicional devida ao elemento de reforço ou à variação de altura da secção, ver a Figura BB.6;

h_{\max} altura máxima de uma secção transversal no comprimento L_y , ver a Figura BB.6;

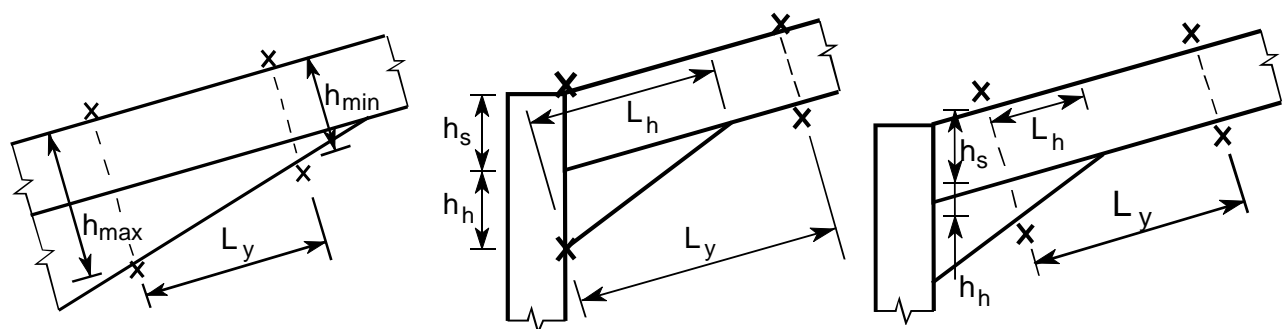
h_{\min} altura mínima de uma secção transversal no comprimento L_y , ver a Figura BB.6;

h_s altura da secção medida na vertical sem considerar o elemento de reforço, ver a Figura BB.6;

L_h comprimento do elemento de reforço contido no comprimento L_y , ver a Figura BB.6;

L_y distância entre os pontos de travamento lateral do banzo comprimido;

(h/t_f) determinado para a menor secção transversal do elemento ou troço.



(a) Troço de secção variável

(b) Troço com esquadro de reforço

(c) Troço com esquadro de reforço

x = travamento

Figura BB.6 – Dimensões que definem o factor de variação da altura da secção transversal

Anexo Nacional NA

Introdução

O presente Anexo Nacional foi elaborado no âmbito da actividade da Comissão Técnica Portuguesa de Normalização CT 115 – Eurocódigos Estruturais, cuja coordenação é assegurada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) na sua qualidade de Organismo de Normalização Sectorial (ONS) no domínio dos Eurocódigos Estruturais.

A inclusão de um Anexo Nacional na NP EN 1993-1-1:2010 decorre do disposto no Preâmbulo desta Norma.

NA.1 – Objectivo e campo de aplicação

Este Anexo Nacional estabelece as condições para a implementação, em Portugal, da NP EN 1993-1-1:2010 – “Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, as quais se referem aos seguintes aspectos:

- a) Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP);
- b) utilização dos Anexos informativos;
- c) informações complementares não contraditórias.

NA.2 – Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP)

NA.2.1 – Generalidades

Os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP) relativos aos Princípios e às Regras de Aplicação onde são permitidas opções nacionais são estabelecidos no Preâmbulo da presente Norma.

Nas secções NA.2.2 e NA.2.3 referem-se, respectivamente, os Princípios e Regras de Aplicação sem prescrições a nível nacional e com prescrições a nível nacional. As prescrições a nível nacional, indicadas na secção NA.2.3, são referenciadas do mesmo modo que no corpo da Norma mas precedidas de “NA– “.

NA.2.2 – Princípios e Regras de Aplicação sem prescrições a nível nacional

Relativamente a:

- 3.2.2(1)
- 3.2.3(3)B
- 3.2.4(1), Nota 3B
- 5.2.1(3)
- 5.3.2(3)
- 6.1(1)
- 6.1(1), Nota 2B
- 6.3.2.2(2)
- 6.3.2.3(2)
- 6.3.2.4(2)B

prescinde-se de introduzir prescrições a nível nacional, devendo adoptar-se as correspondentes prescrições constantes desta Norma e, se tal for o caso, os procedimentos ou os valores aí recomendados.

NA.2.3 – Princípios e Regras de Aplicação com prescrições a nível nacional

a) NA–2.3.1(1)

Para além das acções quantificadas nas diversas Partes do Eurocódigo 1, deve considerar-se igualmente a acção sísmica quantificada na NP EN 1998-1:2010, bem como as acções geotécnicas quantificadas na NP EN 1997-1:2010.

b) NA–3.1(2)

A utilização de aços estruturais e outros produtos distintos dos incluídos no Quadro 3.1 está condicionada à aposição da marcação CE aos produtos em questão.

c) NA–3.2.1(1)

Adopta-se a opção a), isto é, os valores da tensão de cedência (f_y) e da tensão última (f_u) devem ser os indicados na respectiva norma de produto. Refira-se que alguns desses valores são inferiores aos do Quadro 3.1.

d) NA–3.2.3(1)P

Deve adoptar-se o valor da temperatura mínima de serviço recomendado na NP EN 1991-1-5:2009. Em condições particulares, o caderno de encargos da obra pode estipular valores mais baixos para a temperatura mínima de serviço.

e) NA–5.2.2(8)

Não é permitida a aplicação deste método.

f) NA–5.3.2(11)

Não é permitida a aplicação deste método.

g) NA–5.3.4(3)

O valor $k = 0,5$ recomendado pode ser adoptado desde que o elemento satisfaça as condições estipuladas em 6.3.1.2(4).

h) NA–6.3.2.3(1)

Adoptam-se os valores $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,2$ e $\beta = 1$ e o Quadro NA–6.5 em vez do Quadro 6.5.

Quadro NA–6.5 – Curvas de encurvadura lateral para secções transversais,
quando é utilizada a expressão (6.57)

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Chama-se a atenção para o facto de que, com estes valores de $\bar{\lambda}_{LT,0}$ e β , e a alteração do Quadro 6.5, o método alternativo (descrito em 6.3.2.3) conduz aos mesmos valores de χ_{LT} do método geral (descrito em 6.3.2.2).

Para a aplicação desta secção, consideram-se secções soldadas equivalentes as secções soldadas que respeitem as seguintes condições: a relação da inércia dos banzos no seu plano deve ser inferior a 1,2; a secção deve ser simétrica em relação à alma; $t_{f,max}/t_w \leq 3$ e $d/t_w \leq 72\epsilon/\eta$, em que η é um parâmetro definido no Anexo Nacional da NP EN 1993-1-5.

i) NA-6.3.2.4(1), Nota 2B

Adopta-se o valor $\bar{\lambda}_{c0} = 0,3$.

j) NA-6.3.3(5), Nota 2

Qualquer dos dois métodos alternativos (Método 1 e Método 2) pode ser utilizado na verificação de segurança de colunas-viga.

k) NA-6.3.4(1), Nota

Este método só pode ser aplicado nos casos não cobertos nas secções 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3, desde que a curva utilizada para determinar χ_{op} seja devidamente justificada.

l) NA-7.2.1(1)B

No caso de não serem acordados outros valores com o dono de obra, os valores limites recomendados para os deslocamentos verticais em edifícios são os indicados no Quadro NA.I e ilustrados na Figura NA.I (para o caso de uma viga simplesmente apoiada) tendo-se:

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$$

em que:

- δ_{max} flecha no estado final relativamente à linha recta que une os apoios;
- δ_0 contra-flecha da viga no estado não carregado, (estado (0));
- δ_1 variação da flecha da viga devida às acções permanentes imediatamente após a sua aplicação, (estado (1));
- δ_2 variação da flecha da viga devida à acção variável de base associada aos valores de combinação das restantes acções variáveis (estado (2)), ou seja:

$$Q_{k,1} + \sum_{i=2}^m \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Quadro NA.I – Valores recomendados para os limites dos deslocamentos verticais

Condições	Limites (ver a Figura NA.I)	
	δ_{\max}	δ_2
Coberturas em geral	$L/200$	$L/250$
Coberturas utilizadas frequentemente por pessoas, para além do pessoal de manutenção	$L/250$	$L/300$
Pavimentos em geral	$L/250$	$L/300$
Pavimentos e coberturas que suportem rebocos ou outros acabamentos frágeis ou divisórias não flexíveis	$L/250$	$L/350$
Pavimentos que suportem colunas (a não ser que o deslocamento tenha sido incluído na análise global para o estado limite último)	$L/400$	$L/500$
Quando δ_{\max} possa afectar o aspecto do edifício	$L/250$	-
NOTA: No caso geral, L representa o vão da viga. No caso de vigas em consola, L representa duas vezes o vão real da consola.		

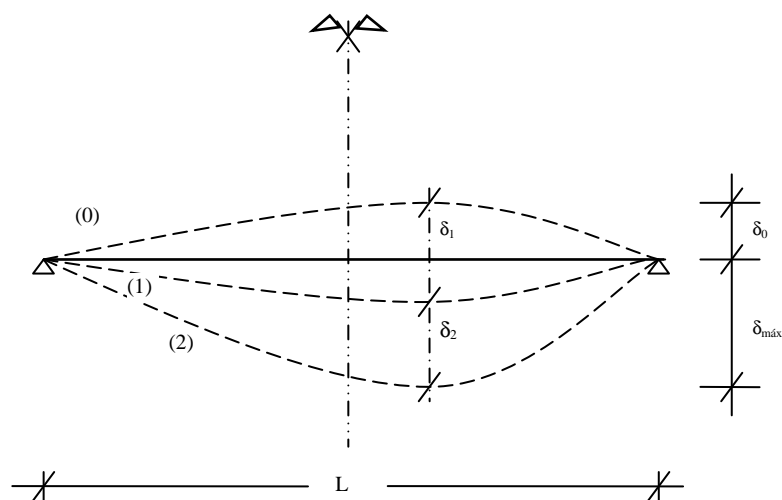


Figura NA.I – Deslocamentos verticais a considerar

m) NA-7.2.2(1)B

No caso de não serem acordados outros valores com o dono de obra, os limites recomendados para os deslocamentos horizontais no topo das colunas para as combinações características são os seguintes:

- Pórticos sem aparelhos de elevação: $h/150$
- Outros edifícios de um só piso: $h/300$
- Em edifícios de vários pisos:
Em cada piso: $h/300$

Na estrutura globalmente $h_0/500$

em que:

h altura da coluna ou do piso;

h_0 altura da estrutura.

n) NA-7.2.3(1)B

Para ser dispensada a verificação das acelerações verticais máximas de uma estrutura, é necessário que as suas frequências próprias associadas a modos verticais sejam superiores a 3 Hz, em estruturas de edifícios de escritórios, habitação e instalações similares ou a 5 Hz, em estruturas de ginásios ou edifícios com funções semelhantes. No caso de ser efectuada uma análise dinâmica, as acelerações verticais máximas devem ser limitadas aos valores indicados no Quadro NA.II.

Quadro NA.II – Níveis máximos de aceleração aceitáveis

Tipo de estrutura	Nível máximo de aceleração	Comentários
Passadiços e outras estruturas pedonais	$a \leq 0,10g$	
Edifícios	$a \leq 0,02g$	
Ginásios, recintos desportivos, salas de dança e salas de concerto	$a \leq 0,05g$	Se os efeitos acústicos forem pequenos e se as vibrações afectarem apenas as pessoas no pavimento cuja vibração se está a analisar, o limite pode passar a 0,10g.

O cálculo de frequências próprias ou a análise dinâmica podem ser dispensados sempre que as flechas, devidas às cargas permanentes e à parcela frequente das sobrecargas, sejam inferiores a 28 mm, em edifícios correntes, ou a 10 mm, em estruturas de ginásios ou edifícios com funções semelhantes.

o) NA-BB.1.3(3)B

O valor $0,75L$, em que L é o comprimento da barra, só pode ser adoptado para comprimento de encurvadura na direcção normal ao plano da estrutura quando tal for devidamente justificado com base na rigidez de torção das cordas e/ou a rigidez de flexão de elementos concorrentes nos nós das barras. Se tal não for possível, deve adoptar-se o valor L para esse comprimento de encurvadura.

NA.3 – Utilização dos Anexos informativos

Em Portugal, os Anexos AB e BB mantêm o carácter informativo e os Anexos A e B passam a ter carácter normativo.

NA.4 – Informações complementares

NA.4.1 – Objectivo

Na secção NA.4 são fornecidas informações complementares não contraditórias com as prescrições da presente Norma, visando auxiliar a aplicação desta Norma.

NA.4.2 – Informações gerais

a) Relação da NP EN 1993-1-1 com outros Eurocódigos e com outras normas relativas a produtos de construção

A presente Norma faz parte de um conjunto de normas correntemente designadas por Eurocódigos Estruturais, relativas ao projecto estrutural e geotécnico de edifícios e de outras obras de engenharia civil. Assim, o projecto de estruturas de aço deve ter em conta o disposto nos diversos Eurocódigos que se interligam com esta Norma, salientando-se, no caso de Portugal, os requisitos estabelecidos na NP EN 1998-1:2010 – “Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios”, já que esses requisitos podem envolver aspectos relativos ao cálculo ou à pormenorização dos elementos estruturais.

O projecto de estruturas de aço deve igualmente satisfazer os requisitos de todas as outras normas e especificações aplicáveis. De entre essas normas têm particular relevância as relativas ao aço estrutural e à execução de estruturas de aço.

NA.4.3 – Informações específicas

a) Imperfeições para a análise global dos pórticos (5.3.2(3))

Chama-se a atenção para o facto de as designações “análise elástica” e “análise plástica” que figuram no Quadro 5.1 dizerem respeito ao método de verificação da resistência da secção (e não ao método utilizado para determinar os esforços na barra ou na estrutura).

NA.5 – Correspondência entre as normas europeias referidas na presente Norma e as normas nacionais

Norma europeia	Norma nacional	Título
EN 1990:2002	NP EN 1990:2009	<i>Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas</i>
EN 1991-1-1:2002	NP EN 1991-1-1:2009	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios</i>
EN 1991-1-2:2002	NP EN 1991-1-2:2010	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-2: Acções gerais – Acções em estruturas expostas ao fogo</i>
EN 1991-1-3:2003	NP EN 1991-1-3:2009	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-3: Acções gerais – Acções da neve</i>

Norma europeia	Norma nacional	Título
EN 1991-1-4:2005	NP EN 1991-1-4:2010	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento</i>
EN 1991-1-5:2003	NP EN 1991-1-5:2009	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-5: Acções gerais – Acções térmicas</i>
EN 1993-1-2:2005	NP EN 1993-1-2:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo</i>
EN 1993-1-8:2005	NP EN 1993-1-8:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-8: Projecto de ligações</i>
EN 1993-1-9:2005	NP EN 1993-1-9:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-9: Fadiga</i>
EN 1993-1-10:2005	NP EN 1993-1-10:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura</i>
EN 10025-2:2004	NP EN 10025-2:2007	<i>Produtos laminados a quente de aços de construção – Parte 2: Condições técnicas de fornecimento para aços de construção não ligados</i>
EN 10025-3:2004	NP EN 10025-3:2009	<i>Produtos laminados a quente de aços de construção – Parte 3: Condições técnicas de fornecimento de aços de construção soldáveis de grão fino no estado normalizado/laminado normalizado</i>
EN 10025-4:2004	NP EN 10025-4:2009	<i>Produtos laminados a quente de aços de construção – Parte 4: Condições técnicas de fornecimento de aços de construção soldáveis de grão fino obtidos por laminagem termomecânica</i>
EN 10025-5:2004	NP EN 10025-5:2009	<i>Produtos laminados a quente de aços de construção – Parte 5: Condições técnicas de fornecimento de aços de construção com superior resistência à corrosão atmosférica</i>
EN 10025-6:2004 +A1:2009	NP EN 10025-6:2004 +A1:2009	<i>Produtos laminados a quente de aços de construção – Parte 6: Condições técnicas de fornecimento para produtos planos de aço de construção de alto limite elástico no estado temperado e revenido</i>
EN ISO 1461:1999	NP EN ISO 1461:2002	<i>Revestimentos de zinco por imersão a quente sobre produtos acabados de ferro e aço – Especificações e métodos de ensaio</i>

NP
EN 1993-1-1
2010

p. 116 de 116

Norma europeia	Norma nacional	Título
EN ISO 12944-4:1998	NP EN ISO 12944-4:1999	<i>Tintas e vernizes – Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura – Parte 4: Tipos de superfície e de preparação de superfície</i>
EN ISO 12944-6:1998	NP EN ISO 12944-6:1999	<i>Tintas e vernizes – Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura – Parte 6: Ensaio de desempenho em laboratório</i>
EN ISO 12944-7:1998	NP EN ISO 12944-7:2000	<i>Tintas e vernizes – Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura – Parte 7: Execução e supervisão dos trabalhos de pintura</i>
EN ISO 12944-8:1998	NP EN ISO 12944-8:2001	<i>Tintas e vernizes – Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura – Parte 8: Desenvolvimento de especificações para obras novas e manutenção</i>