

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

DESCRIPTORIOS

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

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.

$$\chi_{M1} = 1,0 \quad (\text{secção 6.1})$$

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 ≤ 40 mm	y - y z - z	a b	a_0 a_0
			40 mm < t_f ≤ 100 mm	y - y z - z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	t_f ≤ 100 mm	y - y z - z	b c	a a
			t_f > 100 mm	y - y z - z	d d	c c
Perfis I soldados		t_f ≤ 40 mm		y - y z - z	b c	b c
		t_f > 40 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

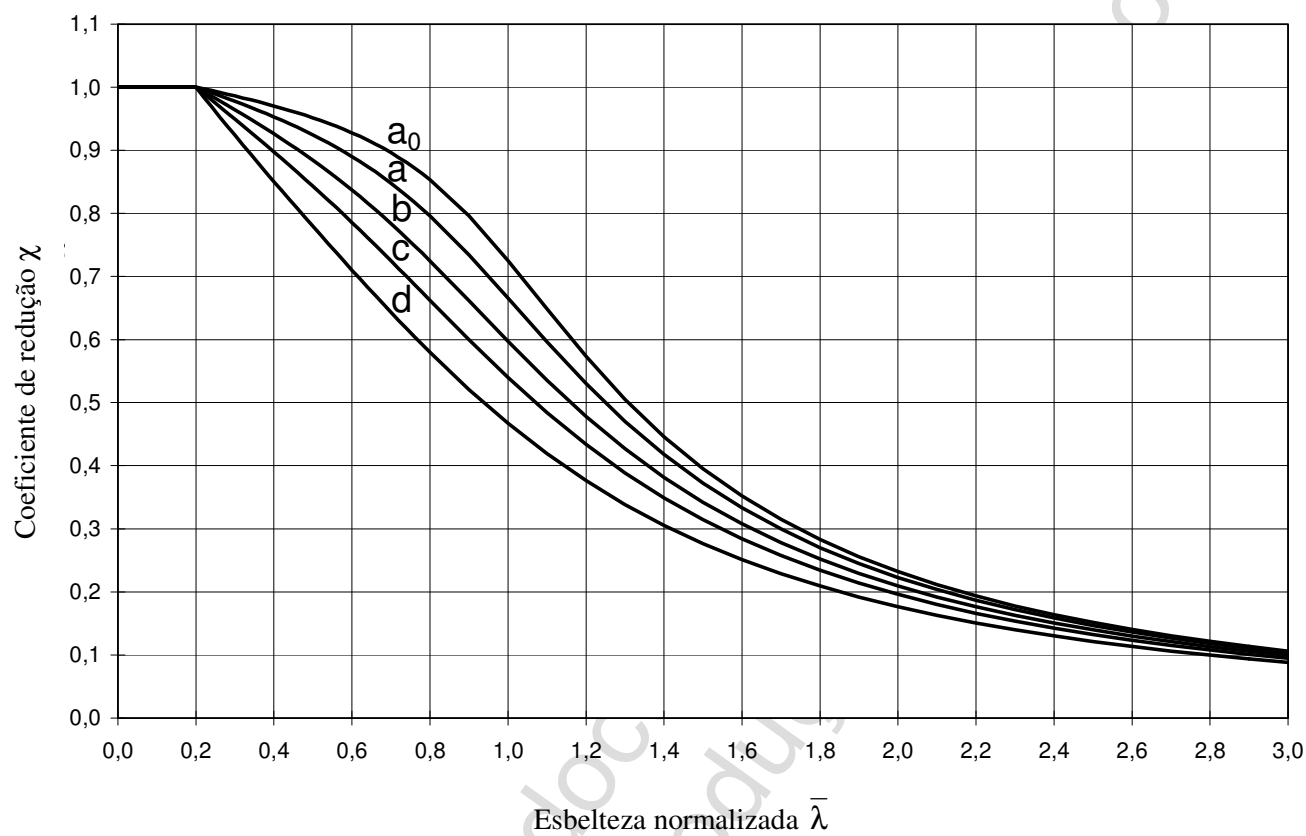


Figura 6.4 – Curvas de encurvadura

Classes das secções:

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:

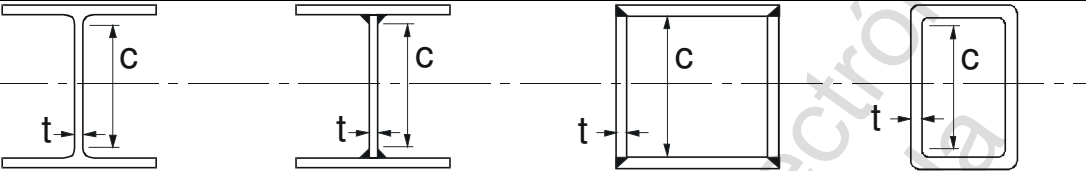
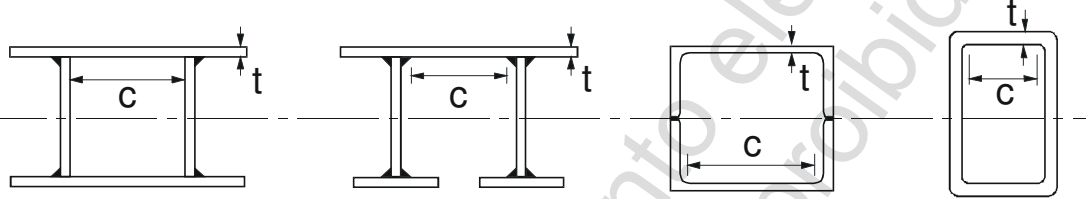
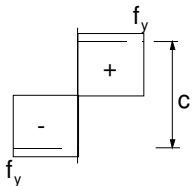
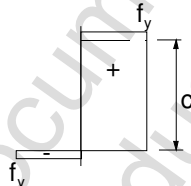
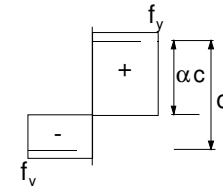
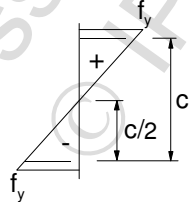
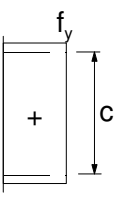
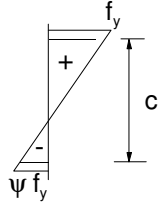
- o elemento tem secções transversais da Classe 1 nos locais onde se situem rótulas plásticas;
- no caso de se aplicar à alma da secção transversal onde se situe uma rótula plástica uma força transversal superior a 10 % da resistência ao esforço transversal dessa secção, ver 6.2.6, deverão ser colocados 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:

- 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;
- 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);

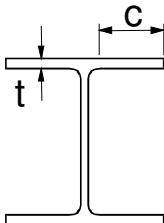
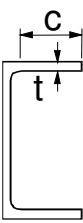
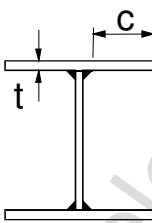
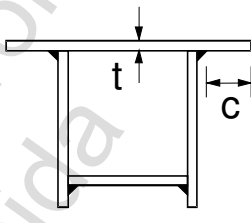
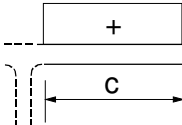
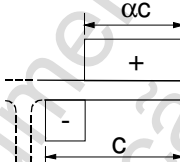
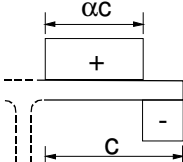
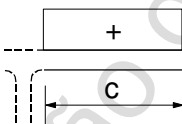
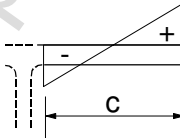
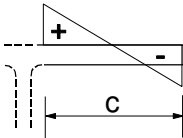
- distância à secção adjacente em que o momento actuante no elemento diminui para 0,8 vezes o momento resistente plástico na secção considerada;
- c) nas restantes zonas do elemento, o banzo comprimido deverá ser da Classe 1 ou 2 e a alma deverá ser da Classe 1, 2 ou 3.
- (4) Nas zonas adjacentes a uma 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

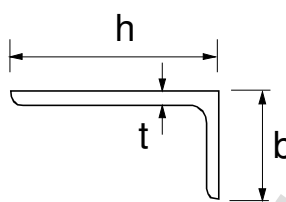
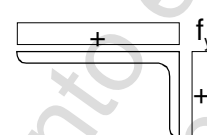
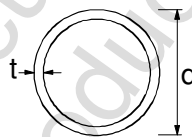
Componentes internos comprimidos						
						Eixo de flexão
						Eixo de flexão
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$		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

(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).