

projecto de
estruturas metálicas
eurocódigo 3, *Parte 1-10*

*Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a
espessura*

A.J.Reis



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Seminário Eurocódigos Estruturais: o início da sua aplicação em Portugal

LISBOA • LNEC • 17 a 19 de Maio de 2010

Norma Portuguesa

NP
EN 1993-1-10
2009

Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço
Parte 1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades
segundo a espessura

Eurocode 3: Calcul des structures en acier
Partie 1-10: Choix des qualités d'acier vis-à-vis de la ténacité
et des propriétés dans le sens de l'épaisseur

Eurocode 3: Design of steel structures
Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties

NP EN 1993 -1-10

1. GENERALIDADES

2. ESCOLHA DOS MATERIAIS PARA A TENACIDADE À FRACTURA

3. ESCOLHA DOS MATERIAIS PARA AS PROPRIEDADES SEGUNDO A ESPESSURA

ANEXO NACIONAL

Rotura Frágil : Fundamentos

Modos de Rotura do material Aço:

-Cedência Plástica

-Rotura Frágil e Arranque Lamelar

-Fadiga

AÇOS estruturais : Materiais

- Resistência mecânica e soldabilidade
- Carbono equivalente

$$C_e = C + \frac{M_n}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

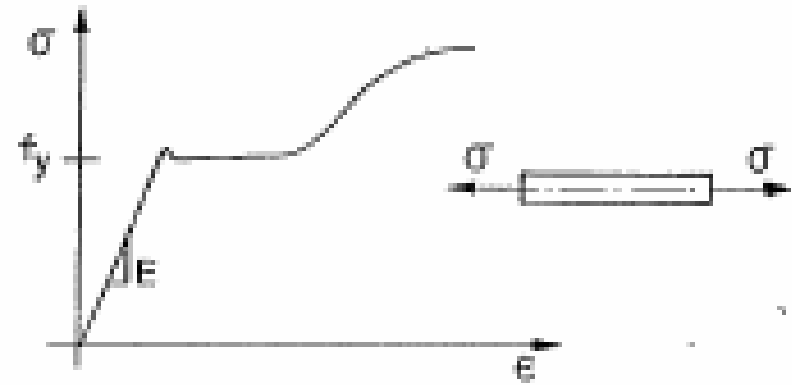
aços para estruturas soldadas $C_e < 0,43\%$.

Aços com Ce < 0,4% - soldáveis com poucos ou nenhuns riscos de fendilhação - formação de martensite ou presença de hidrogénio na **HAZ**

zona afectada pelo calor - **ZAC** ou **HAZ-Heat Affected Zone**

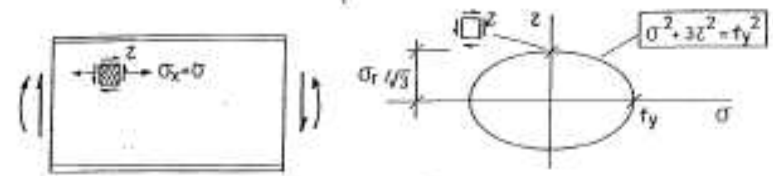
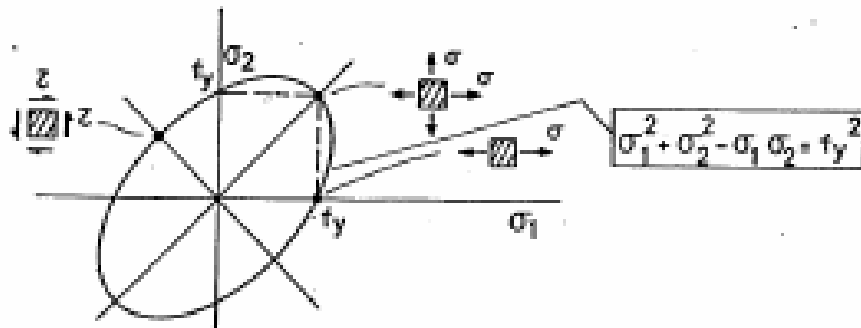
Resistência mecânica : tensão de cedência, ductilidade e resistência à rotura frágil (tenacidade - Ensaios Charpy)

Cedência Plástica



von Mises-Hencky

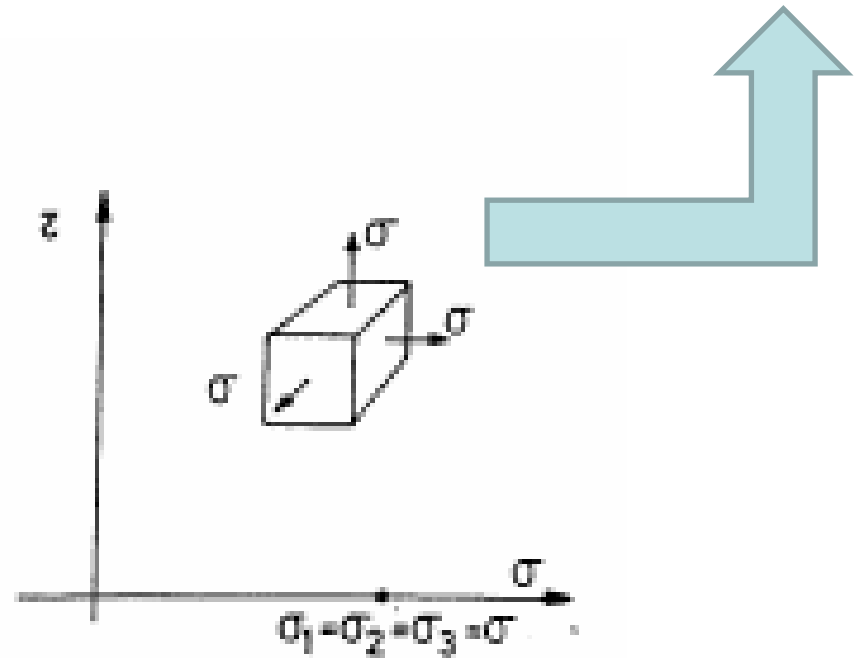
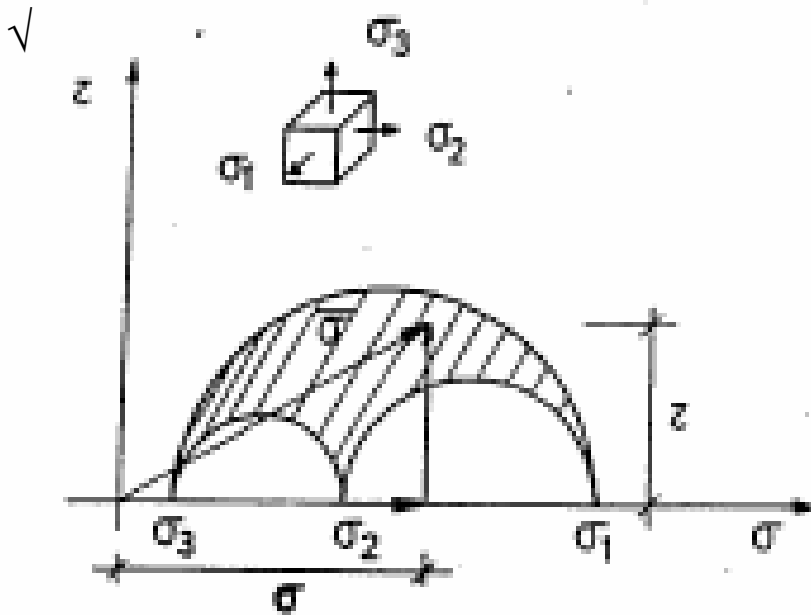
$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1$$



A.J.Reis

Estados triaxiais de tracção

$$(\sigma_{comp})^2 = [(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_3)^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3] = 0$$



Não há cedência plástica: o material rompe por

Rotura frágil

DUCTILIDADE

Os limites dos valores da relação f_u / f_y , da extensão após rotura e da extensão última ϵ_u podem 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 ($\epsilon_y = f_y / E$).

TENACIDADE

Tenacidade- capacidade de resistência à propagação de fendas sobre tensões de tracção.

Medida no Ensaio Charpy

NP269 (1962) - "Metais-Ensaio de Choque Charpy de Provette Entalhado"

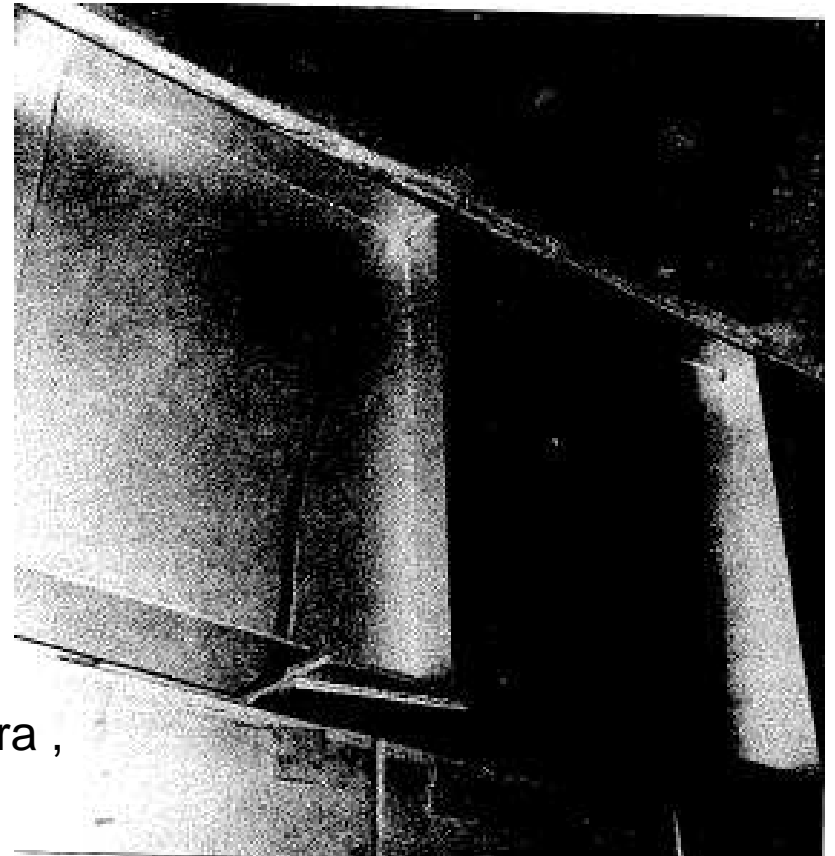
EN 10045 - Metallic materials Charpy impact test

Rotura frágil

Factores responsáveis por roturas frágeis:

- baixas temperaturas
- concentração de tensões
- composição e defeitos do aço
- elevadas velocidades de deformação

Kings Bridge, s/ o rio Yarra ,
Melbourne, 1962





Brittle fracture
of the Hoan bridge

December 13, 2000

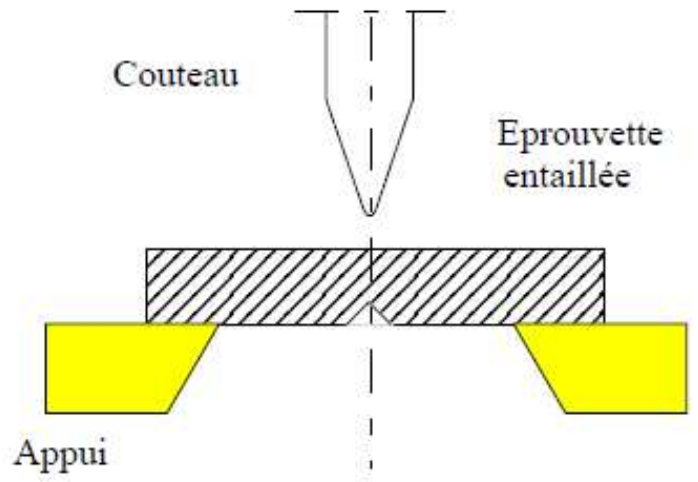
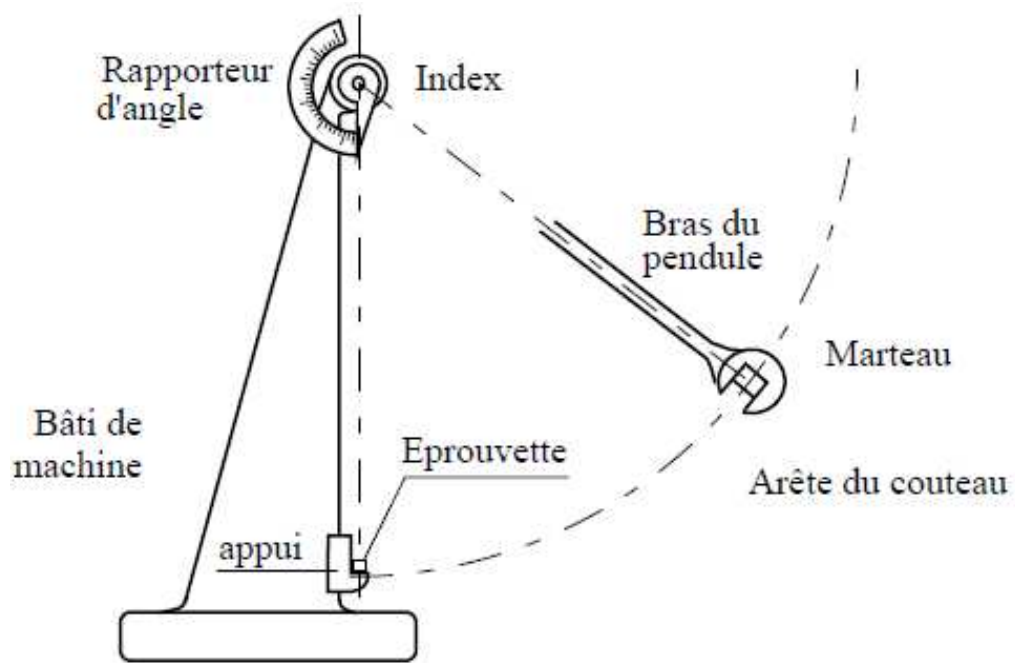


A.J.Reis

12

Ref. J. Raoul, SETRA

Ensaio Charpy



Détail de l'éprouvette bi-appuyée

Adapt. Ref. J.Raoul, SETRA

A.J.Reis

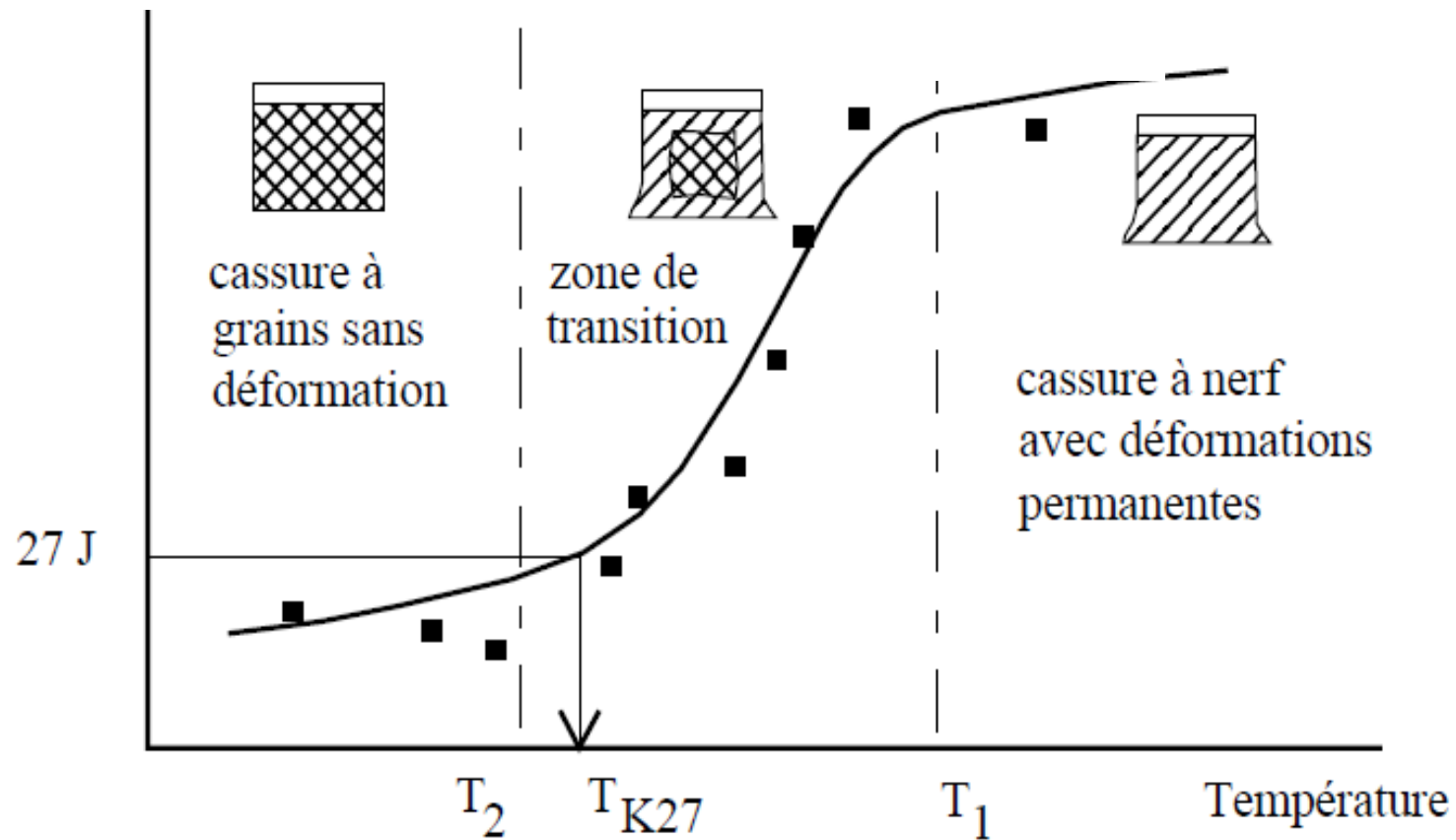


Pêndulo Charpy



Foto J.Raoul SETRA

TENACIDADE -TEMPERATURA



Ref. J. Raoul, SETRA

A.J.Reis

TENACIDADE -TEMPERATURA

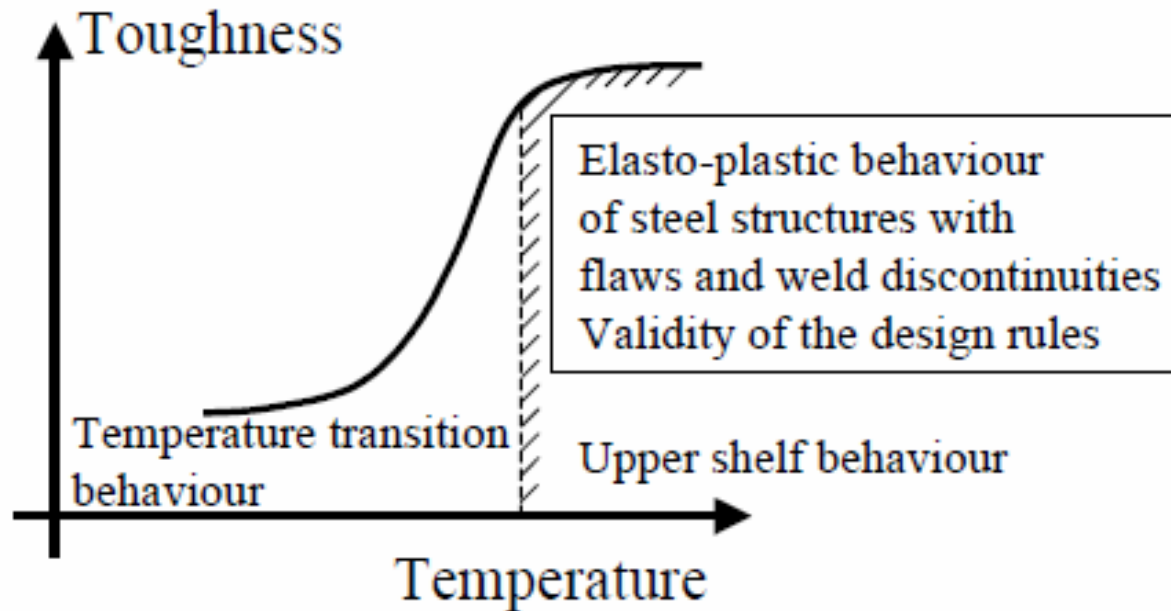


Fig. 2-2: Temperature range for validity of design rules in Eurocode 3

Ref. : ECCS COMMENTARY AND WORKED EXAMPLES
to EN 1993-1-10 "Material toughness and
through thickness properties"

Relação entre a energia de impacto e a temperatura

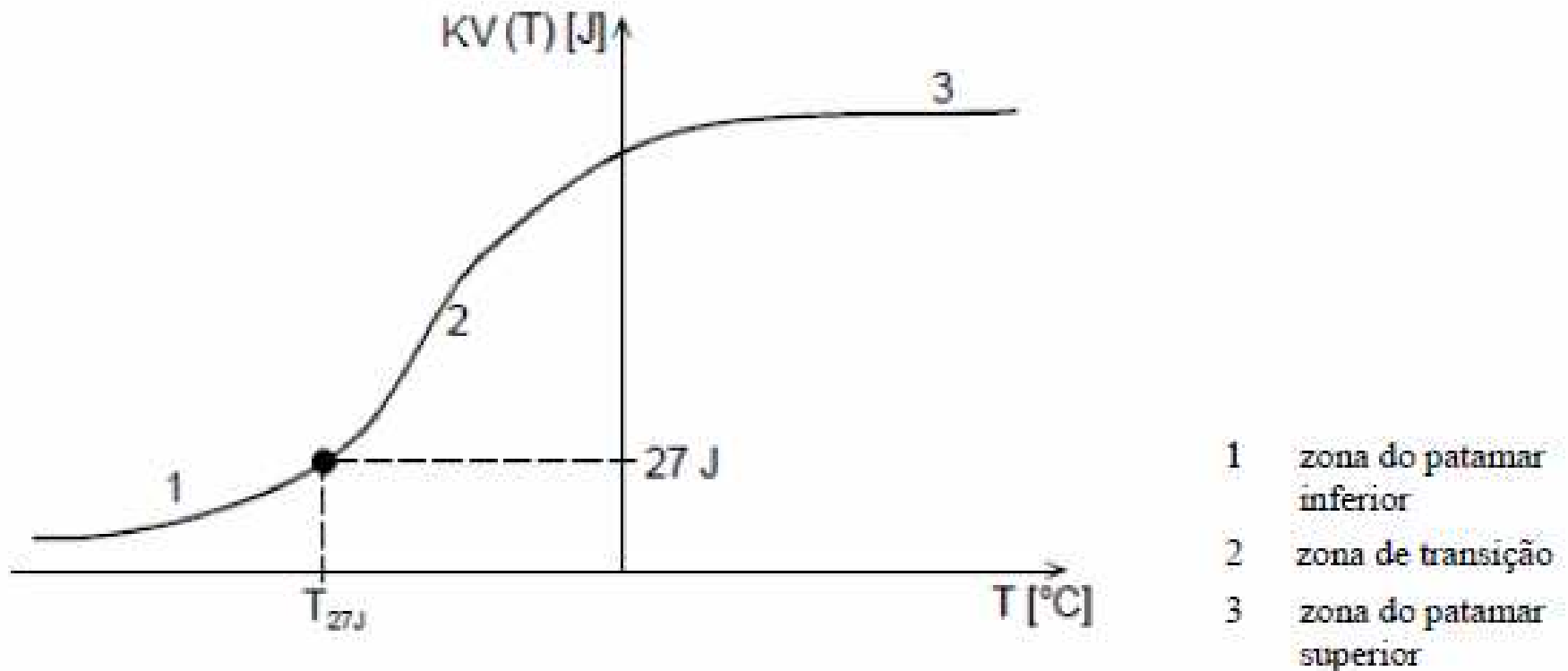


Figura 1.1 – Relação entre a energia de impacto e a temperatura

NP EN 1993 -1-10

Correlação entre tenacidades, para diferentes energias de impacto

T_{27J}. na EN 1993-1-10 baseiam-se nas EN 10025, EN 10210, EN10219-1

Para outros valores usar as relações:

$$T_{40J} = T_{27J} + 10 [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{30J} = T_{27J} + 0 [^{\circ}\text{C}]$$

English version

Designation systems for steels - Part 1: Steel names

Systèmes de désignation des aciers - Partie 1: Désignation
symbolique

Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 1: Kurznamen

This European Standard was approved by CEN on 27 June 2005.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

Designações dos aços

Exemplos:

S355 NL Z35

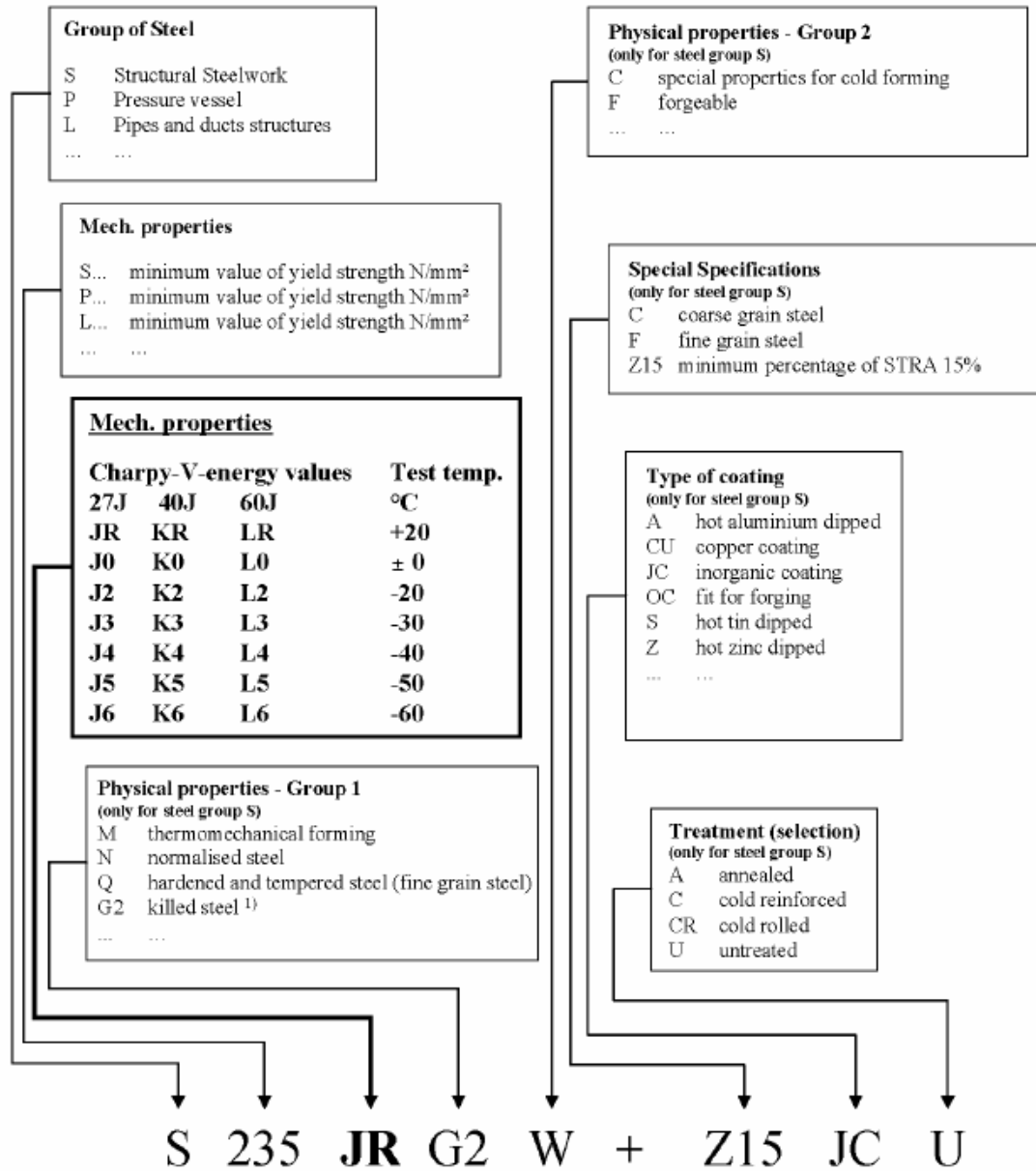
S355 K2 Z15

A.J.Reis



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: rue de Steenant, 36 B-1050 Brussels



¹⁾ old designation; acc. to EN 10025:2004 unkilld steels will no longer be produced, so that the tokens G1 (unkilled) and G2 (killed) will cease to exist.

Ref. ECCS

**COMMENTARY AND WORKED EXAMPLES
 to EN 1993-1-10 "Material toughness and
 through thickness properties"
 and other toughness oriented rules in EN 1993**

G. Sedlacek, M. Feldmann, B. Kühn, D. Tschickardt, S. Höhler, C. Müller, W. Hensen, N. Stranghöner
 W. Dahl, P. Langenberg, S. Münstermann, J. Brozetti, J. Raoul, R. Pope, F. Bijlaard

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

NP EN 1993 -1-1

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

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	A.J.Reis	

NP EN 1993 -1-1

Qualidade do aço : normas europeias

1. "Aços de construção":

EN10025-2-Aços S235, S275 e S355 de qualidades J0, J2 e k2 (só S355)

2. Aços soldáveis de grão fino

EN10025-3-Aços S275, S355, S420 e S460 nas qualidades N ou NL.

3. Aços termomecânicos

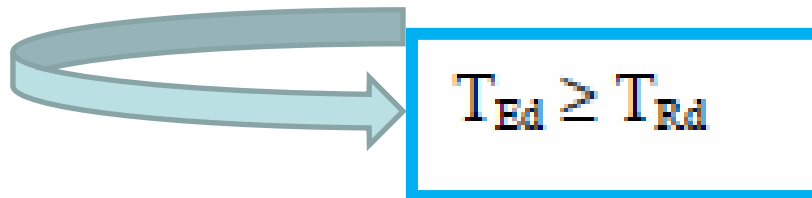
EN10025-4-Aços S275, S355, S420 e S460 nas qualidades M ou ML.

Requisitos de Tenacidade segundo a EN 1993-1-10

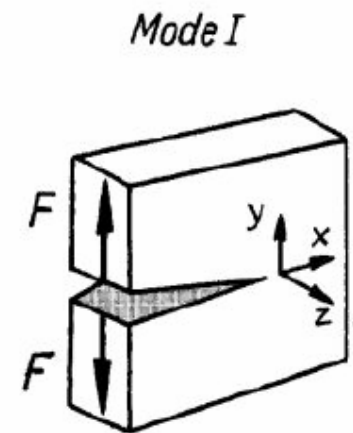
Métodos:

- 1) Determinação da máxima espessura admissível em elementos
- 2) Cálculo da tenacidade com base na Mecânica da Fractura

Factor de intensidade de Tensão K, Tenacidade (T)


$$T_{Ed} \geq T_{Rd}$$

- 3) Avaliação com base em Modelos Físicos



A resistência à rotura frágil é considerada na Parte 1.10 do EC3 – EN1993-1-10 – Selection of Steel for fracture toughness through – thickness properties.

A qualidade do aço deve ser especificada, tendo em conta a espessura máxima do elemento a soldar e a temperatura mínima de projecto.

EC3 Parte 1.10: Tabela 2.1 1993-1-10

espessuras limites para evitar a verificação à rotura frágil para uma temperatura de referência T_{Ed} (valor de cálculo da temperatura mínima de projecto EN 1991 -1-5) e nível de tensão normal σ_{Ed}

Ex. $T_{Ed} = -10^{\circ}\text{C}$ e $\sigma_{Ed} = 0,5 f_y$

max $t = 65\text{mm}$ para o aço S355JO

max. $t = 110\text{mm}$ para os aços S355k2 ou S355N

max $t = 155\text{mm}$ para o aço S355NL.

Temperatura de Referência segundo a EN 1993-1-10

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_{\dot{\epsilon}} + \Delta T_{\epsilon_{cf}}$$

- T_{md} temperatura atmosférica mais baixa para um período de retorno especificado, ver a EN 1991-1-5;
- ΔT_r termo de ajustamento para as perdas por radiação, ver a EN 1991-1-5;
- ΔT_σ ajustamento associado ao nível de tensão instalado, à tensão de cedência do material, à imperfeição das fendas e à forma e dimensões do elemento, ver 2.4(3);
- ΔT_R margem de segurança, se necessária, para diferenciar o nível de fiabilidade para diferentes aplicações;
- $\Delta T_{\dot{\epsilon}}$ termo de ajustamento para uma velocidade de deformação que não seja a velocidade de deformação de referência $\dot{\epsilon}_0$ (ver a expressão 2.3);
- $\Delta T_{\epsilon_{cf}}$ termo de ajustamento para o grau de enformagem a frio ϵ_{cf} (ver a expressão 2.4).

2.3.2 Determinação dos valores admissíveis máximos da espessura do elemento

Níveis de Tensão

$$\text{a) } \sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t) \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\text{b) } \sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t) \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\text{c) } \sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t) \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Combinação de acções

$$E_d = E \{ A[T_{Ed}] \text{ "+" } \sum G_K \text{ "+" } \psi_1 Q_{K1} \text{ "+" } \sum \psi_{2,i} Q_{Ki} \}$$

Valores recomendados

$$\Delta T_r = -3 \text{ ou } -5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_\sigma = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_R = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\dot{\epsilon}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ acções estáticas}$$

$$\dot{\epsilon}_0 = 4 \times 10^{-4} / \text{s}$$

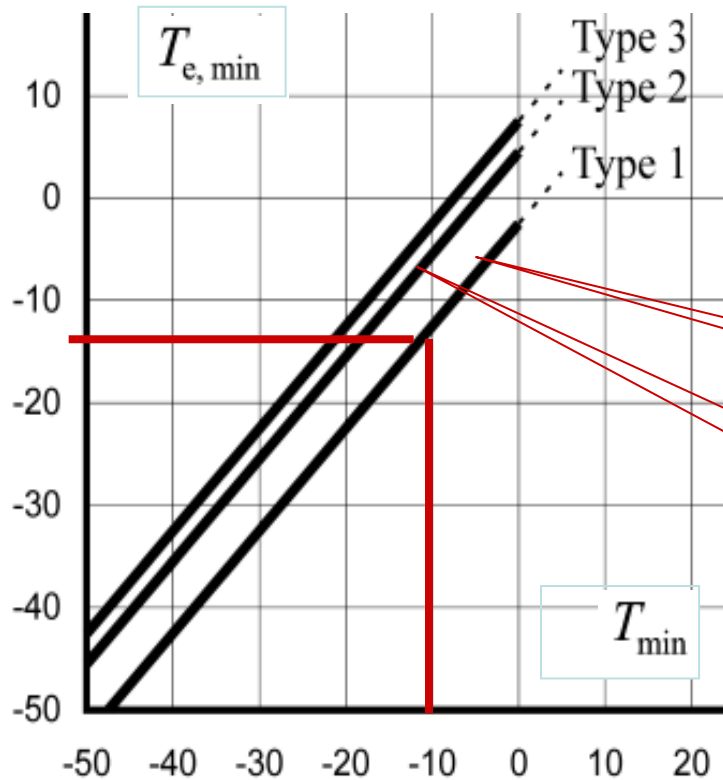
$$\Delta T_{\epsilon_{ef}} = 0 \text{ ou seg. Eq. 2.4}$$

$$\Delta T_{\dot{\epsilon}} = - \frac{1440 - f_y(t)}{550} \times \left(\ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{1.5} \text{ } [^\circ\text{C}]$$

Em geral:

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r$$

T_{md} Temperatura Mínima na estrutura NP EN 1991-5
 ΔT_r efeito de radiação (-3°C)



Pontes Metálicas

Pontes Mistas

Quadro 2.1 – Valores máximos admissíveis da espessura do elemento t em mm

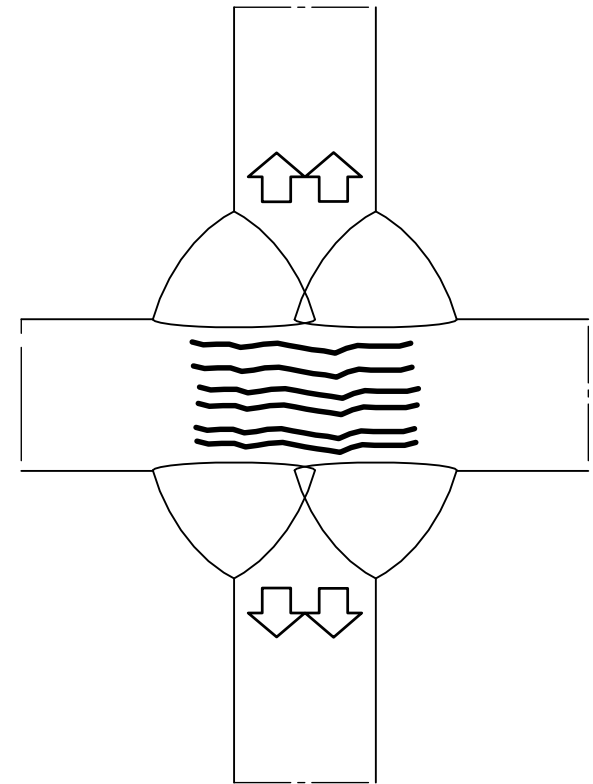
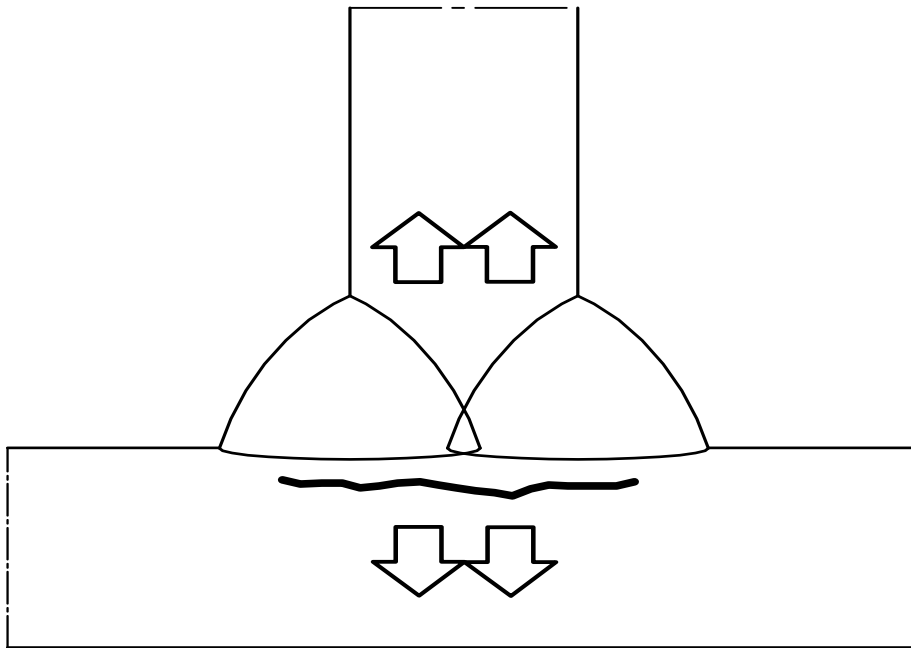
Classe de aço	Qualidade	KV		Temperatura de referência T _{Ed} [°C]																							
		a T [°C]	J _{min}	σ _{Ed} = 0,75 f _y (t)								σ _{Ed} = 0,50 f _y (t)								σ _{Ed} = 0,25 f _y (t)							
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60			
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75			
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100			
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80	70	60	55			
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110	95	80	70			
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	145	125	110	95			
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	165	145	125	110			
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145			
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	60	55	45			
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60			
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80			
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95			
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130			
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85			
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120			
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70			
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130			
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45			
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50			
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85			
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100			

NP EN 1993 -1-1

A.J.Reis

Classe de aço	Qualidade	KV		Temperatura de Referência T _{ED}						
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50
		a T [°C]	J _{min}	$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$						
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40

Arranque Lamelar



Propriedades através da espessura (EN 1993 1-10)

EN 10164

Especificação de Z : Ex. S355 NL Z15

Table 3.2: Choice of quality class according to EN 10164

Target value of Z_{Ed} according to EN 1993-1-10	Required value of Z_{Rd} expressed in terms of design Z-values according to 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

Arranque Lamelar

Desprezar se :

$$Z_{Ed} < Z_{Rd}$$

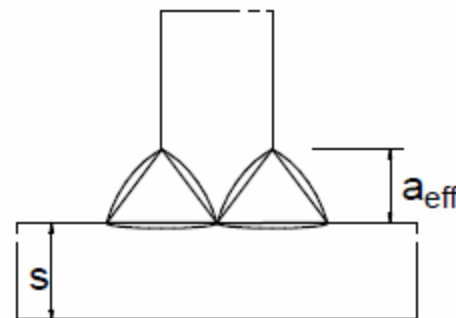
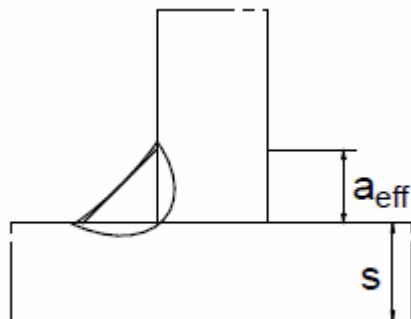
O valor de cálculo de Z_{Ed} necessário poderá ser determinado a partir da expressão:

$$Z_{Ed} = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d + Z_e \quad (2.9)$$

na qual Z_a , Z_b , Z_c , Z_d e Z_e são dados no Quadro 3.2(EN 1993 1-10)

Quadro 3.2 – Critérios que afectam o valor-alvo de Z_{Ed}

a)	Espessura da soldadura respeitante à deformação por retracção do metal	Espessura efectiva da soldadura a_{eff} (ver a Figura 3.2)	Espessura do cordão de soldadura de ângulo (a)	Z_i
		$a_{eff} \leq 7 \text{ mm}$	$a = 5 \text{ mm}$	$Z_a = 0$
		$7 \text{ mm} < a_{eff} \leq 10 \text{ mm}$	$a = 7 \text{ mm}$	$Z_a = 3$
		$10 \text{ mm} < a_{eff} \leq 20 \text{ mm}$	$a = 14 \text{ mm}$	$Z_a = 6$
		$20 \text{ mm} < a_{eff} \leq 30 \text{ mm}$	$a = 21 \text{ mm}$	$Z_a = 9$
		$30 \text{ mm} < a_{eff} \leq 40 \text{ mm}$	$a = 28 \text{ mm}$	$Z_a = 12$
		$40 \text{ mm} < a_{eff} \leq 50 \text{ mm}$	$a = 35 \text{ mm}$	$Z_a = 15$
		$50 < a_{eff}$	$a > 35 \text{ mm}$	$Z_a = 15$



b)	Forma e posição das soldaduras nas juntas em T, cruciformes e de canto		$Z_b = -25$
	ligações de canto		$Z_b = -10$
	soldaduras de canto de uma só passagem $Z_a = 0$ ou soldaduras de canto com $Z_a > 1$ com depósito superficial de um material de soldadura de baixa resistência		$Z_b = -5$
	soldaduras de canto com multipassagens		$Z_b = 0$
	soldaduras com penetração total ou parcial	<p>com a sequência de soldadura adequada para redução dos efeitos da retracção</p>	$Z_b = 3$
	soldaduras com penetração total ou parcial		$Z_b = 5$
	juntas de canto		$Z_b = 8$
	NP EN 1993 -1-1		

Quadro 3.2 (cont.) – Critérios que afectam o valor-alvo de Z_{Ed}

c)	Efeito da espessura do material s no impedimento da retracção	$s \leq 10 \text{ mm}$		$Z_c = 2^*$
		$10 \text{ mm} < s \leq 20 \text{ mm}$		$Z_c = 4^*$
		$20 \text{ mm} < s \leq 30 \text{ mm}$		$Z_c = 6^*$
		$30 \text{ mm} < s \leq 40 \text{ mm}$		$Z_c = 8^*$
		$40 \text{ mm} < s \leq 50 \text{ mm}$		$Z_c = 10^*$
		$50 \text{ mm} < s \leq 60 \text{ mm}$		$Z_c = 12^*$
		$60 \text{ mm} < s \leq 70 \text{ mm}$		$Z_c = 15^*$
		$70 \text{ mm} < s$		$Z_c = 15^*$
d)	Impedimento da retracção após a soldadura por outras partes da estrutura	Impedimento baixo:	Contração livre permitida (por exemplo, ligações em T)	$Z_d = 0$
		Impedimento médio:	Contração livre limitada (por exemplo, diafragmas das vigas em caixão)	$Z_d = 3$
		Impedimento elevado:	Contração livre impedida (por exemplo, nas lajes de tabuleiro ortotrópicas)	$Z_d = 5$
e)	Influência do pré-aquecimento	Sem pré-aquecimento		$Z_e = 0$
		Pré-aquecimento $\geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$		$Z_e = -8$
* Poderá ser reduzido de 50 % para o material solicitado à compressão, segundo a espessura, por cargas predominantemente estáticas.				

Anexo Nacional NA

b) NA-2.2(5), Nota 4

Admite-se a aplicação do Quadro 2.1 até à Classe S 690.

NA.3 – Informações complementares

a) Temperatura Mínima de Serviço NP EN 1991 1-5 , ou outras mais baixas em condições particulares, segundo o CE

AN da NP EN 1993 -1-1

b) Qualidade a adoptar para o aço em estruturas soldadas

Qualidade mínima J0 em estruturas soldadas para edifícios com chapas $t > 40\text{mm}$

Outros tipos de estruturas - segundo as outras partes do EC3