

CAPÍTULO IV – ASPECTOS NORMATIVOS PARA CONTENTORES

4.1 – Introdução

Neste capítulo, apresentam-se as disposições normativas dos eurocódigos estruturais que podem ser usadas para verificar a segurança dos elementos constituintes dos contentores e realizar a análise global da estrutura.

4.2 - Classificação de secções segundo o EC3

Uma vez que os contentores são constituídos por elementos metálicos, procede-se à classificação da secção de cada elemento à luz dos eurocódigos estruturais, designadamente o EC3 [1].

Esta classificação é importante para a modelação numérica dos contentores, como se verá na secção 4.4.

A classificação das secções transversais dos elementos estruturais é descrita na cláusula 5.5 do EC3-1-1 [1] e traduz a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciadas por fenómenos de encurvadura local. Enquanto que numa secção compacta as zonas comprimidas podem plastificar completamente, numa secção esbelta isso já pode não acontecer devido aos fenómenos de encurvadura local.

Segundo o EC3-1-1 [1], consoante a sua capacidade de rotação e capacidade para formar uma rótula plástica, as secções classificam-se em:

- Classe 1 – são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com uma capacidade de rotação superior à mínima exigida para a utilização de métodos plásticos de análise;
- Classe 2 – são aquelas em que é possível atingir o momento plástico mas que possuem uma capacidade de rotação limitada;

- Classe 3 – são aquelas em que a tensão na fibra extrema mais comprimida do elemento de aço, assumindo uma distribuição elástica, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que o momento plástico poderá não ser atingido, devido à encurvadura local;
- Classe 4 – são aquelas onde a encurvadura local impede que seja atingida a tensão de cedência nas zonas mais comprimidas da secção.

A classificação de uma secção é efectuada com base na relação entre o comprimento e a espessura (c/t) dos elementos total ou parcialmente comprimidos (alma e banzo), nos esforços actuantes (esforço axial e momento flector) e na classe do aço, segundo os procedimentos contidos na cláusula 5.5 do EC3-1-1 [1]. Os valores limite das relações c/t dos elementos comprimidos, para a maioria das secções correntes, encontram-se nas Tabelas 4.1 e 4.2 retirados do Quadro 5.2 da cláusula 5.5 do EC3-1-1 [1]. As diversas colunas referem-se aos diversos tipos de esforços actuantes no elemento em causa (alma ou banzo) e a classe do aço é tida em conta através do parâmetro ε , cujo valor se obtém pela Equação 4.1.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.1)$$

Onde:

f_y – tensão de cedência.

Tabela 4.1 - Relações máximas comprimento-espessura (c/t) de elementos internos [1]

Internal compression parts						
				Axis of bending		
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression			
1						
	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2						
	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
3						
	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$ or the tensile strain $\epsilon_y > f_y/E$

Tabela 4.2 - Relações máximas comprimento-espessura (c/t) de banzos em consola [1]

Outstand flanges						
		Rolled sections		Welded sections		
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression				
		Tip in compression		Tip in tension		
Stress distribution in parts (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Stress distribution in parts (compression positive)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see 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

As secções constituídas por perfis laminados a quente de dimensões correntes (HEA, HEB, IPE; etc...), em geral, pertencem a classes 1, 2 ou 3. As secções de classe 4 são mais frequentes em perfis enformados a frio ou perfis formados por soldadura.

Como se viu no Capítulo III, a quase totalidade dos elementos constituintes dos contentores são obtidos por enformagem a frio de chapas de aço Corten A, sendo geralmente secções de classe 4.

4.3 – Secções efectivas

O dimensionamento de estruturas com secções transversais de classe 4 apresenta uma complexidade adicional relativamente a secções transversais de classes 1 a 3, já que, uma vez que ocorre a encurvadura local da secção antes de se atingir a

tensão de cedência do aço num ou mais pontos da secção, torna-se necessário determinar, directa ou indirectamente, a resistência à encurvadura local.

Assim, na cláusula 5.5.2 (2) do EC3-1-1 [1], preconiza-se a utilização de secções efectivas como forma de incorporar o efeito da encurvadura local de forma indirecta no dimensionamento e remete para a parte 1-5 do EC3 [3] (Estruturas constituídas por placas).

Depois de calcular as secções efectivas, a verificação da segurança de elementos com secção de classe 4 sujeita a tensões normais (nas almas ou banzos) é efectuada de forma análoga aos elementos com secção de classe 3 (EC3 - 1-1 [1]).

Sendo os perfis em estudo perfis enformados a frio, consultou-se a parte 1-3 do EC3 – Elementos e chapas finas enformados a frio. Segundo o EC3 – 1-3 [2], cláusula 5.5.1 (1), os efeitos da encurvadura local devem ser considerados na determinação da resistência e rigidez de elementos e chapas enformados a frio. A consideração da encurvadura local é efectuada usando as propriedades das secções efectivas, calculadas tendo por base as larguras efectivas (cláusula 5.5.1 (2)), ou seja, também remete para a parte 1-5 do EC3 [3].

A parte 1-3 [2] está preparada para secções comerciais de classe 4, o que não é o caso das secções constituintes dos contentores.

De acordo com o EC3-1-5- 4.2(1) [3], as verificações da resistência de secções e da estabilidade à compressão e à encurvadura lateral e torsional de elementos devem ser efectuadas utilizando as propriedades geométricas das correspondentes secções efectivas (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}), onde A_{eff} denota a área efectiva, I_{eff} o momento de inércia efectivo e W_{eff} o módulo elástico efectivo da secção. Note-se que o estabelecimento das propriedades efectivas deve ser feito, como regra geral, com base em diagramas de extensões lineares, limitados à extensão de cedência no plano médio das placas comprimidas (EC3-1-5- 4.2(2) [3]).

A verificação da segurança de secções na presença de esforço axial e momentos flectores é feita de acordo com as seguintes expressões:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{A_{eff} \times f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (4.2)$$

$$\eta_1 = \frac{(M_{y,Ed} + N_{Ed} \times e_{y,N})}{W_{eff,y} \times f_y / \gamma_{Mo}} \leq 1 \quad (4.3)$$

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{A_{eff} \times f_y / \gamma_{Mo}} + \frac{(M_{y,Ed} + N_{Ed} \times e_{y,N})}{W_{eff,y} \times f_y / \gamma_{Mo}} + \frac{(M_{z,Ed} + N_{Ed} \times e_{z,N})}{W_{eff,z} \times f_y / \gamma_{Mo}} \leq 1 \quad (4.4)$$

Onde:

A_{eff} – área efectiva da secção, determinado de acordo com a cláusula 4.4(3) do EC3-1-5 [3];

$e_{y,N}$, $e_{z,N}$ – variação da posição do eixo neutro elástico segundo y e z, respectivamente;

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ – momento flector de dimensionamento segundo y e z, respectivamente;

N_{Ed} – esforço axial de dimensionamento;

W_{eff} - módulo elástico efectivo da secção segundo y e z, respectivamente, segundo a cláusula 4.3(4) do EC3 – 1-5 [3].

A verificação da segurança de elementos com secção de classe 4 implica a determinação da sua secção efectiva. Uma vez determinada a área efectiva de cada elemento da secção, as propriedades geométricas efectivas são calculadas da forma usual, desprezando as áreas não efectivas. É recomendado determinar as propriedades efectivas da secção relevantes para cada tipo de esforço de forma independente.

Segundo a cláusula 4.4 do EC3-1-5 [3], no caso de secções constituídas por placas não reforçadas, a área efectiva de uma placa ou a parte comprimida de uma placa, $A_{c,eff}$, com área A_c é dada por:

$$A_{c,eff} = \rho_c \times A_c \quad (4.5)$$

Onde:

ρ_c – factor de redução para encurvadura da placa.

Para elementos internos comprimidos, ρ_c é dado por:

$$\rho_c = 1 \quad \lambda_p \leq 0.673 \quad (4.6)$$

$$\rho_c = \frac{\lambda_p - 0.055(3 + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1 \quad \lambda_p > 0.673 \text{ e } (3 + \psi) \geq 0 \quad (4.7)$$

E para elementos externos, por:

$$\rho_c = 1 \quad \lambda_p \leq 0.748 \quad (4.8)$$

$$\rho_c = \frac{\lambda_p - 0.188}{\lambda_p^2} \leq 1 \quad \lambda_p > 0.748 \quad (4.9)$$

Em ambos os casos, o coeficiente de esbelteza adimensional de uma placa λ_p é dado por:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28.4 \times \epsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (4.10)$$

Onde:

ψ – quociente entre as tensões máximas e mínimas na placa (determinado nas tabelas 4.1 e 4.2 do EC3 -1-5 [3] - Tabelas 4.3 e 4.4);

b – largura de cálculo da placa, sendo:

b_w para almas;

b para elementos internos de banzos (excepto RHS);

$b - 3t$ para banzos de RHS;

c para elementos em consola de banzos;

h para secções em L de abas iguais e desiguais;

t – espessura da placa;

k_σ – coeficiente de encurvadura da placa, determinado em função de ψ e das condições de fronteira (Tabelas 4.3 e 4.4 [3]);

σ_{cr} – tensão crítica elástica da placa.

Apresentam-se nas Tabelas 4.3 e 4.4 as fórmulas para a largura efectiva em elementos internos e em elementos externos.

Tabela 4.3 - Fórmulas para a largura efectiva em elementos internos [3]

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Buckling factor k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabela 4.4 - Fórmulas para a largura efectiva em elementos externos [3]

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}		
				$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho c$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	-1	1	$\psi - 3$
Buckling factor k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$		
				$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho c$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	
Buckling factor k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8	

Ilustra-se na Figura 4.1, um exemplo de redução de secção submetida a momento flector, em que a secção apresenta a alma de classe 4 que é este o elemento que sofre a redução.

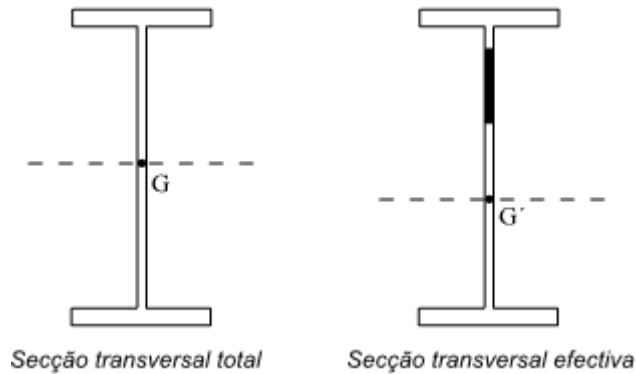


Figura 4.1 – Exemplo de redução de secção submetida a momento flector [9]

Na Figura 4.2, ilustra-se um exemplo de redução de secção submetida a esforço axial.

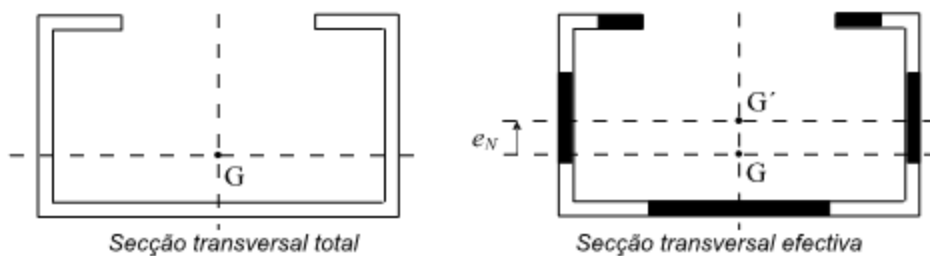


Figura 4.2 – Exemplo de redução de secção submetida a esforço axial [9]

4.4 – Análise global

Em termos normativos, segundo a cláusula 2.2(1) da parte 1-5 do EC3 [3] os efeitos da encurvadura local dos elementos¹ podem afectar os resultados da análise global da estrutura, devendo por isso ser considerados no dimensionamento.

¹ **Nota:** A designação “elemento” diz respeito aos elementos internos assim como aos elementos externos, ou seja, a alma e o banzo.

No contexto da análise elástica global da estrutura, estes efeitos são potencialmente tomados em consideração através de áreas efectivas dos elementos comprimidos (EC3-1-5 [3] cláusula 2.2(4)).

No entanto, segundo a cláusula 2.2(5) da parte 1-5 do EC3 [3], para a análise global, a redução das secções transversais pode ser desprezada quando a secção efectiva de um elemento comprimido for superior a 50% da área bruta da secção transversal do mesmo elemento. Ou seja, o factor de redução para encurvadura da placa ρ_c terá de ser superior a 0,5 (ver Equação 4.4).

Sendo assim, antes de se proceder à análise elástica global do contentor, esta condição terá de ser verificada para saber se, na modelação do contentor, a secção dos elementos que irá ser inserida no modelo será a secção real ou a secção efectiva. Esta verificação terá de ser feita para todos os elementos constituintes do contentor, elemento a elemento, após se ter executado a classificação de cada um. Esta verificação encontra-se no Capítulo V.