



III CONGRESSO LUSO-AFRICANO DE
Construção Metálica
Sustentável

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA REGULAMENTAÇÃO PARA ESTRUTURAS *OFFSHORE* NO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS TUBULARES CIRCULARES EM AÇO (ISO 19902 E EC3)

Tiago Manco^a, João Pedro Martins^a, Constança Rigueiro^b e Luís Simões da Silva^a

^a *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal*

^b *ISISE, Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal*

Resumo. O objectivo deste artigo é efectuar uma análise comparativa de normas no dimensionamento de estruturas *offshore* com foco em elementos circulares tubulares em aço. Pretende concluir-se acerca do conservadorismo associado a dois grupos de normas: *offshore* vs. construção. Para tal, a capacidade resistente obtida pela ISO 19902 será confrontada com a obtida pelo Eurocódigo 3 (que não contém indicações específicas para estas estruturas) através da parte 1-1 e 1-6. Por fim, estas resistências serão comparadas com uma análise numérica para esforços de compressão e pressão hidrostática, concluindo-se que ambas as partes do EC3 podem, de uma forma geral, ser aplicadas a estruturas *offshore*.

1. Introdução

A bibliografia apresenta alguns estudos acerca da comparação de normas para estruturas *offshore*. No entanto, poucos tratam da capacidade resistente. Existem algumas excepções, por exemplo [1,2,3]. Contudo, considera-se que estes ainda omitem ou que ainda não tratam com a desejada minuciosidade alguns aspectos que se julgam importantes, nomeadamente uma ampla variação paramétrica, avaliação da pressão hidrostática de forma aprofundada e verificação da interacção de esforços desenvolvida. Relativamente à inclusão do Eurocódigo, o que se encontra na bibliografia é ainda mais escasso. Existem excepções, como por exemplo [3,4]. Mais uma vez, acredita-se que existem lacunas a preencher e que o estudo deva ser continuado e aprofundado. Neste aspecto as principais limitações encontradas dizem respeito à classe das secções estudadas, à não contabilização da pressão hidrostática no Eurocódigo e a avaliação limitada da interacção entre esforços. De forma ainda mais significativa, verifica-se a falta de estudos que concluam acerca do nível de conservadorismo associado a cada norma, através da comparação com o método dos elementos finitos.

O propósito deste trabalho é apresentar uma análise comparativa do dimensionamento de elementos tubulares circulares em aço em estruturas *offshore* (em particular em estruturas fixas), através de diferentes ópticas regulamentares, nomeadamente da ISO 19902 e Eurocódigo

3 (EN 1993-1-1 e EN 1993-1-6). Pretende-se comparar os resultados obtidos entre a referida norma para estruturas *offshore* e as normas de construção, concluindo acerca do nível de segurança inerente a cada grupo. Procurando tirar conclusões mais aprofundadas a este nível, comparar-se-ão os resultados obtidos por cada uma destas normas com os resultados obtidos do estudo numérico de elementos finitos que se levou a cabo através do *software* ABAQUS.

2. Modelação numérica

No presente estudo recorreu-se a análises elásticas lineares de estabilidade (LBA) para determinar a carga crítica elástica (R_{cr}) e os modos de encurvadura de tubos cilíndricos perfeitos. A primeira serviu para calcular a esbelteza dos elementos ($\lambda = \sqrt{R_{pl}/R_{cr}}$) sendo R_{pl} a carga de plastificação, enquanto os segundos foram usados como padrão para as imperfeições geométricas equivalentes a utilizar nas análises geometricamente e materialmente não-lineares com imperfeições (GMNIA). Uma vez que os fenómenos de encurvadura têm trajetórias de equilíbrio (carga-deslocamento) não monotónicas, para que se consiga eficientemente traduzir este comportamento foi utilizado o método de Riks, sendo este um dos algoritmos de resolução mais eficiente utilizado em problemas de pós-encurvadura.

O comportamento do material foi considerado elástico-linear e elástico-perfeitamente plástico, respectivamente para a LBA e GMNIA, com um módulo de elasticidade (E) de 210 GPa, um coeficiente de Poisson (ν) de 0,3 e uma tensão de cedência (f_y) de 355 MPa. O comportamento elástico-perfeitamente plástico é, de acordo com a bibliografia [5] o comportamento mais vezes aplicado a este tipo de análises em aços macios como os aqui considerados.

A modelação dos tubos foi feita recorrendo a elementos do tipo de casca S8R5. Este apresenta 8 nós com 5 graus de liberdade por nó, 3 translações e 2 rotações (omitida a perpendicular à superfície). A malha foi definida com $5 \times 5 \text{ cm}^2$ a partir de um estudo de convergência.

Relativamente às condições de fronteira consideraram-se os tubos simplesmente apoiados, isto é, libertando-se numa extremidade as rotações nos dois eixos do plano da secção e na outra estas duas rotações mais a translação na direcção axial (a rotação segundo o eixo axial foi bloqueada). No caso da pressão hidrostática a actuar isoladamente foi considerada a situação de total encastramento, sendo que a direcção axial não tem aqui um papel importante.

O Eurocódigo foi a norma utilizada para simular as imperfeições a introduzir no modelo numérico, por ser a que única que oferece indicações específicas. Para a amplitude das imperfeições para a encurvadura global foram utilizados valores de $L/250$, $L/300$ e $L/500$. Os dois primeiros são prescritos no EC3-1-1, respectivamente para uma análise plástica e elástica (para a curva de encurvadura “a”). O valor $L/500$ é o normalmente indicado na bibliografia para elementos tubulares acabados a quente. Para a encurvadura local e circunferencial foi utilizado o prescrito na norma EN 1993-1-6 através das amplitudes de imperfeição a verificar através de comprimentos de referência. Foi considerada a classe de fabricação normal (Classe C).

Para a verificação do modelo de compressão influenciado por fenómenos de encurvadura global foram utilizados os ensaios experimentais de [6] (Tabela 1). Para o modelo de compressão influenciado por fenómenos de encurvadura locais foram utilizados os dados de uma série de ensaios compilados em [7] (

Tabela 2). Para a validação do modelo numérico sujeito à pressão hidrostática foram utilizados os ensaios de [8] (Tabela 3).

Tabela 1: Validação do modelo numérico à compressão (encurvadura global)

Nº	D_{ext} (m)	t (mm)	D/t	L (m)	Δ_{w0} (mm)	f_y (MPa)	E (GPa)	F_{cr} (MN)	F_{pl} (MN)	λ (Num)	λ (EC3-1-1)	χ_x (Num)	χ_x (Exp)	Dif. (%)
4	0,38	7,80	48,72	7,6	6,0	308,0	212,0	5,979	2,809	0,685	0,701	0,925	0,910	1,48
7	0,38	7,80	48,72	11,0	4,4	308,0	212,0	2,880	2,809	0,988	1,014	0,846	0,877	-3,08

10 0,56 7,80 71,79 11,0 4,2 308,0 212,0 9,012 4,167 0,680 0,684 0,968 0,968 0,01

Tabela 2: Validação do modelo numérico à compressão (encurvadura local)

Nº	D _{ext} (m)	t (mm)	D/t	L (m)	Δ _{w0} (mm)	F _y (MPa)	E (GPa)	F _{cr} (MN)	F _{pl} (MN)	λ (Num)	λ (EC3-1-6)	χ _x (Num)	χ _x (Exp)	Dif. (%)
P1	0,717	8,35	85,88	2,05	5,96	319,2	203,4	51,45	5,933	0,340	0,336	0,942	0,998	-5,57
P5	1,787	7,17	249,41	3,03	2,99	377,2	203,4	39,25	15,11	0,620	0,617	0,766	0,814	-4,79
P9	1,532	6,55	233,79	2,44	2,86	622,8	203,4	32,87	19,56	0,771	0,767	0,953	0,912	4,14

Tabela 3: Validação do modelo numérico à pressão lateral (encurvadura circunferencial)

Nº	D _{ext} (m)	t (mm)	L (m)	Δ _{w0} (mm)	f _y (MPa)	E (GPa)	P _{cr} (MPa)	P _{pl} (MPa)	λ (Num)	λ (EC3-1-6)	χ _θ (Num)	χ _θ (EXP)	Dif. (%)
40	0,406	1,27	0,813	0,60	248,2	220,6	0,22	1,55	2,681	2,619	0,111	0,111	-0,01
42	0,406	1,35	0,406	0,43	296,5	206,9	0,50	1,96	1,988	1,946	0,182	0,204	-2,13
46	0,406	1,30	0,102	0,17	275,8	213,7	1,96	1,77	0,950	0,888	0,663	0,637	2,57
69	0,406	2,74	0,406	0,44	282,7	206,9	2,96	3,82	1,140	1,082	0,513	0,520	-0,78

3. Comparação de resultados

3.1 Comparação da resistência dada pela ISO 19902, EC3-1-1 e EC3-1-6

Nesta secção serão apresentadas as resistências de cálculo, i.e. afectadas dos respectivos coeficientes parciais de segurança.

3.1.1 Variação paramétrica

A variação paramétrica utilizada teve como objectivo abranger todas as classes de secções do Eurocódigo e verificar os limites de aplicabilidade da ISO (norma com o limite de D/t mais restrito, <120). A variação da geometria foi obtida mantendo constante o diâmetro de 1,5 m e variando a espessura (t) da parede das secções de 12,5 a 54,5 mm com incrementos de 4 mm. Para cada uma destas secções estabeleceu-se um comprimento de 5, 15 e 25 m para que possam ser devidamente diferenciados os fenómenos de encurvadura locais dos globais.

3.1.2 Compressão

O factor de comprimento efectivo (K) foi considerado com o valor de 1,0. Para avaliar o efeito da encurvadura global nas relações D/t maiores, o EC3-1-1 foi aplicado a todas as classes de secções, ainda que não seja aplicada a classe 4.

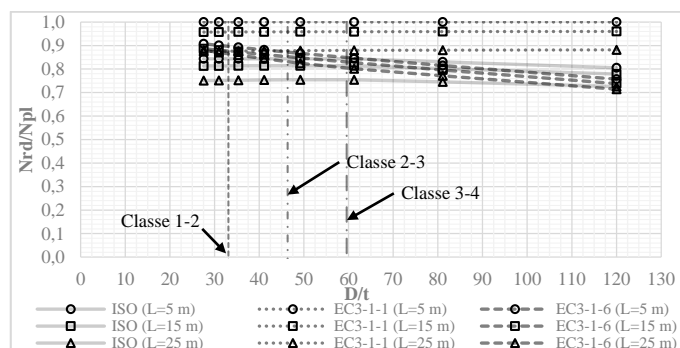


Fig. 1: Resistência normalizada à compressão

A partir da Fig. 1 é possível concluir que o EC3-1-1 oferece valores menos conservativos para a resistência global à compressão que a ISO 19902 em todas as relações D/t. Como seria de esperar, a resistência dos elementos mais longos é mais reduzida devido à maior susceptibili-

dade de ocorrência de fenómenos globais, isto é perceptível tanto na ISO como no EC3-1-1. No EC3-1-6, embora a resistência seja também mais reduzida, a diferença obtida para comprimentos maiores é menor visto o comprimento não ser a variável mais influenciável nos fenómenos de encurvadura local por compressão.

No que concerne à encurvadura local verifica-se que o aumento da relação de D/t tem um impacto maior na redução da resistência no EC3-1-6 que na ISO (maior inclinação das curvas na primeira norma). Contudo, os limites inferiores e superiores da resistência destas duas normas para classe 4 e para os comprimentos considerados são muito semelhantes.

3.1.3 Flexão

O EC3-1-1 utiliza para o cálculo da capacidade resistente à flexão o módulo de flexão plástico para classes 1 e 2, e o módulo de flexão elástico para classe 3. Esta distinção têm como consequência uma redução apreciável da capacidade resistente na passagem desta fronteira, como se pode ver na Fig. 2. Comparativamente, nota-se que para secções classe 1 e 2 os resultados são bastante semelhantes aos da ISO. Na passagem para a classe 3, devido à redução de resistência no EC3 a ISO passa a ser a menos conservativa, mantendo-se assim até ao limite máximo de D/t aqui apresentado. No EC3-1-6 a flexão foi considerada convertendo o momento flector em compressão meridional na parede da secção, verificando a encurvadura local análogamente ao efectuado para a compressão axial.

O comprimento dos elementos tem uma influência nula na resistência à flexão, à excepção do EC3-1-6 em que esta variável tem uma repercussão apenas residual. Além disso, esta norma foi aplicada a secções não susceptíveis à ocorrência de fenómenos de encurvadura local, donde se conclui que a sua aplicação a secções pouco esbeltas conduz a resultados consideravelmente mais conservativos que as restantes normas.

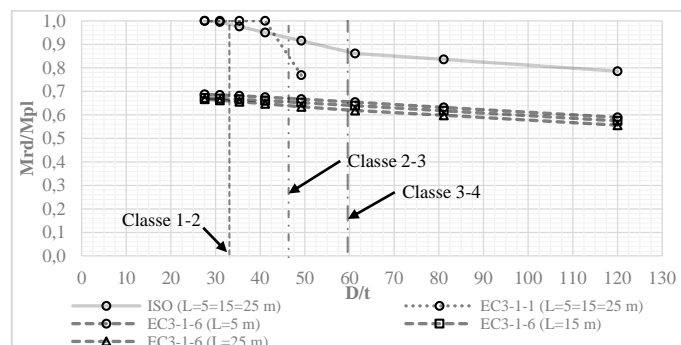


Fig. 2: Resistência normalizada à flexão

3.1.4 Compressão + Flexão

O procedimento adoptado consistiu em fixar o valor da tensão provocada pela flexão em 30 e 60% do valor da tensão de cedência (f_y), retirando o valor máximo permitido para a compressão através da resolução numérica das fórmulas de interacção de cada norma. Este procedimento permite averiguar a influência que a flexão tem nestes elementos comprimidos. Para o factor de redução de momento (C_m) foi utilizado no EC3-1-1 e na ISO o valor indicado pela ISO para colunas de um “*jacket*”, 0,85.

Avaliando a Fig. 3 conclui-se que o EC3-1-1 dá maior importância ao comprimento dos elementos (maior distância entre as curvas de diferentes comprimentos). Para secções de classe 1 e 2 o EC3-1-1 é menos conservativo que a ISO, verificando-se que a diferença é significativa para o comprimento menor. Para secções classe 3, o EC3-1-1 especifica uma quebra considerável na resistência em comparação às dadas para as classes 1 e 2. Esta redução tem como principal responsável os factores de interacção k que têm para classes 3 valores muito mais conservativos que para as classes 1 e 2.

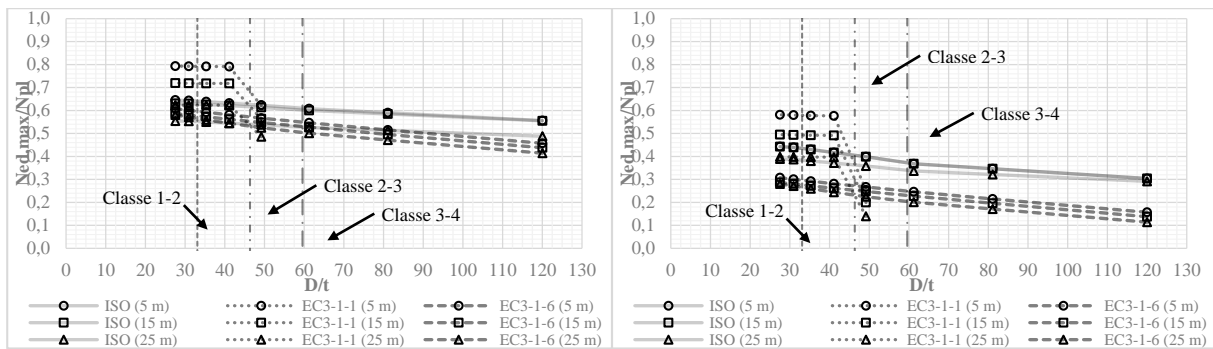


Fig. 3: Resistência normalizada à compressão + flexão (esq.: $\sigma_b=0,3f_y$; dir.: $\sigma_b=0,6f_y$)

3.1.5 Corte (sem torção)

Na Fig. 4 apresenta-se a resistência normalizada ao corte, isto é, a tensão V_{Rd}/A sobre a tensão máxima admissível ao corte ($f_y/\sqrt{3}$), donde se verifica a existência de diferenças significativas entre a ISO e o EC3-1-1. Além disso, nota-se que a resistência é independente da relação D/t, bem como do comprimento do elemento. Por outro lado, devido ao facto do EC3-1-6 tratar o corte analogamente aos outros esforços pela verificação da encurvadura, esta norma estabelece resistências que são naturalmente função da relação D/t. Verifica-se que a resistência oferecida por esta parte do Eurocódigo é consideravelmente menor que as outras duas normas para as relações D/t superiores.

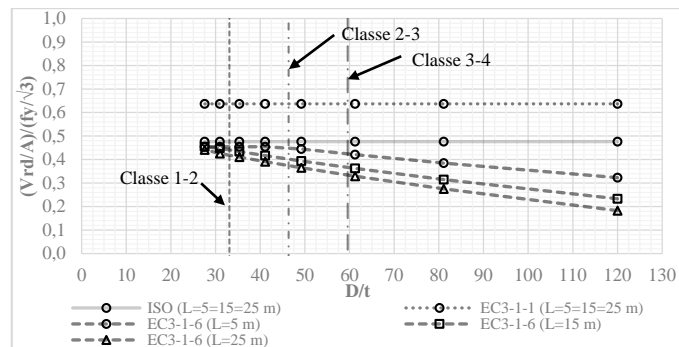


Fig. 4: Resistência normalizada ao corte (sem torção)

3.1.6 Pressão hidrostática

A parte 1-1 do EC3 não permite ter em conta a pressão hidrostática.

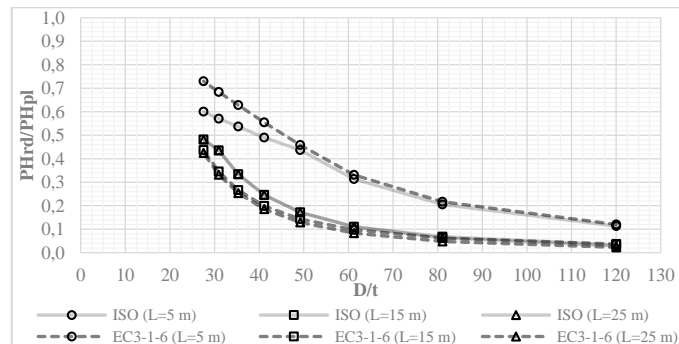


Fig. 5: Resistência normalizada à pressão hidrostática

Na Fig. 5 verifica-se um excelente ajuste das curvas que traduzem a resistência em ambas as normas, sobretudo para D/t maiores que 60 (que marca aproximadamente o limite das secções

de classe 4). Além disto, é notório que o comprimento de 5 m apresenta uma resistência consideravelmente superior em ambas as normas. Nos comprimentos maiores verifica-se que a profundidade resistente apresenta indiferença a esta variável. Para as secções menos esbeltas, onde as diferenças começam a ser perceptíveis ($\approx D/t < 60$) verifica-se que o EC3-1-6 é mais conservativo que a ISO para os tubos mais compridos (15 e 25 m), sendo por outro lado menos conservativo para o tubo mais curto, de 5 m.

3.2 Comparação com os resultados numéricos

A variação paramétrica utilizada ajustou-se ao tipo de análise em estudo. As curvas de redução à encurvadura das normas de seguida apresentadas não têm em conta qualquer factor parcial de segurança para que a comparação possa ser directamente efectuada com os resultados numéricos obtidos.

3.2.1 Compressão axial - Encurvadura local

Para que a comparação entre os resultados numéricos e os estabelecidos pelas normas possam ser mais facilmente interpretados estes foram agregados no mesmo gráfico (Fig. 6). Para tal, uma vez que as abcissas utilizadas nas duas normas são distintas, optou-se por utilizar para este eixo a esbelteza λ calculada pelo EC3-1-6, tendo em conta naturalmente a correspondência entre elas. Na mesma figura são apresentadas as três classes de fabricação do EC3-1-6, onde se verifica que as diferenças entre as diferentes classes podem ser significativas.

O procedimento para aos modos de encurvadura a utilizar como padrão para as imperfeições geométricas equivalentes consistiu em procurar, nos 15 primeiros modos, aquele que se aproximava mais dos comprimentos de referência indicados pelo EC3-1-6, introduzindo-lhe a respectiva amplitude. Foi possível concluir que quando o padrão de deformação destes modos se afasta do definido pelos comprimentos de referência as diferenças podem ser significativas.

A verificação dos fenómenos de encurvadura local foi feita para comprimentos de 5 e 10 m. Contudo, para economizar espaço e pelo facto dos resultados obtidos serem análogos, para o comprimento menor será apenas apresentada a sua compilação no gráfico da Fig. 6.

A partir da observação da Fig. 6 podem-se tirar as seguintes conclusões: em primeiro lugar verifica-se que a curva da ISO é, para as esbeltezas de secções em que é empregue, menos conservativa que qualquer curva para as diferentes classes do EC3-1-6. Tendo isto em conta pode-se conjecturar que as expressões da ISO foram calibradas para imperfeições bastante reduzidas, de acordo com o critério do EC3-1-6. Contudo, importa referir que pelo facto de a ISO limitar a sua aplicação a espessuras ≥ 6 mm e a relações $D/t < 120$ implica que a curva representada não tenha aplicabilidade para as esbeltezas maiores. De facto, dos resultados numéricos apresentados para o comprimento de 10 m, só os três primeiros (espessuras de 0,03, 0,025 e 0,015 m) têm aplicabilidade na ISO. Esta evidência permite afirmar que a ISO não deixa que os elementos sejam fortemente influenciados por fenómenos de encurvadura local, uma vez que o valor de χ apresenta sempre valores relativamente elevados. Contudo, pelo facto de o factor parcial de segurança associado à compressão na ISO ser consideravelmente superior ao do EC3-1-6 (1,18 vs. 1,1) é de esperar que estas diferenças sejam esbatidas nos valores obtidos para as resistências finais, como se viu anteriormente.

No que concerne aos resultados numéricos constata-se que estes (mais propriamente os recolhidos entre os 15 primeiros modos) se aproximam bastante bem da curva de classe C do EC3-1-6, já que as imperfeições foram calculadas tendo em conta esta classe de fabricação. Não se verificam, como seria de esperar em fenómenos de encurvadura local por compressão, diferenças significativas nos resultados obtidos para as resistências nos comprimentos de 5 e 10 m. O facto de os resultados oferecidos pela utilização do primeiro modo de encurvadura se aproximarem bastante bem dos oferecidos pela ISO para o comprimento de 10 m leva a cor-

roborar a ideia de esta norma ter sido formulada tendo em conta imperfeições menos prejudiciais que as utilizadas pelo EC.

Tendo em conta a existência de valores numéricos inferiores aos da curva da ISO, os resultados numéricos foram comparados com a resistência normalizada final oferecida por esta norma (com coeficientes parciais de segurança), verificando-se que dentro do seu campo de aplicação, a ISO oferece resultados seguros, mesmo utilizando as imperfeições do EC3-1-6.

Tabela 4: Resultados numéricos para a encurvadura local e comparação com o EC3-1-6 (L=10 m)

Classe	D_{ext} (m)	t (mm)	D/t	Δ_{w0} (mm)	F_{cr} (MN)	F_{pl} (MN)	λ (Num)	λ (EC)	χ_x (EC)	1º modo		15 primeiros modos		
										χ_x (Num)	Dif. (%)	Modo Enc.	χ_x (Num)	Dif. (%)
cl.3	1,5	30	50	18,75	604,92	49,18	0,285	0,313	0,922	1,000	7,73	9º	0,969	4,71
cl.4	1,5	25	60	15,63	429,82	41,13	0,309	0,335	0,905	0,997	9,19	13º	0,915	1,01
cl.4	1,5	15	100	10,55	163,92	24,84	0,389	0,413	0,838	0,980	14,16	13º	0,882	4,41
cl.4	1,5	10	150	8,62	75,01	16,62	0,471	0,492	0,760	0,949	18,87	13º	0,789	2,82
cl.4	1,5	7,0	214	7,21	37,49	11,66	0,558	0,577	0,665	0,898	23,28	13º	0,653	-1,24
cl.4	1,5	5,0	300	6,09	19,33	8,34	0,657	0,674	0,543	0,809	26,61	9º	0,547	0,40
cl.4	1,5	2,5	600	4,31	4,92	4,18	0,921	0,932	0,228	0,294	6,66	3º	0,292	6,49
cl.4	1,5	1,5	1000	3,34	1,78	2,51	1,185	1,189	0,107	0,149	4,17	3º	0,149	4,15

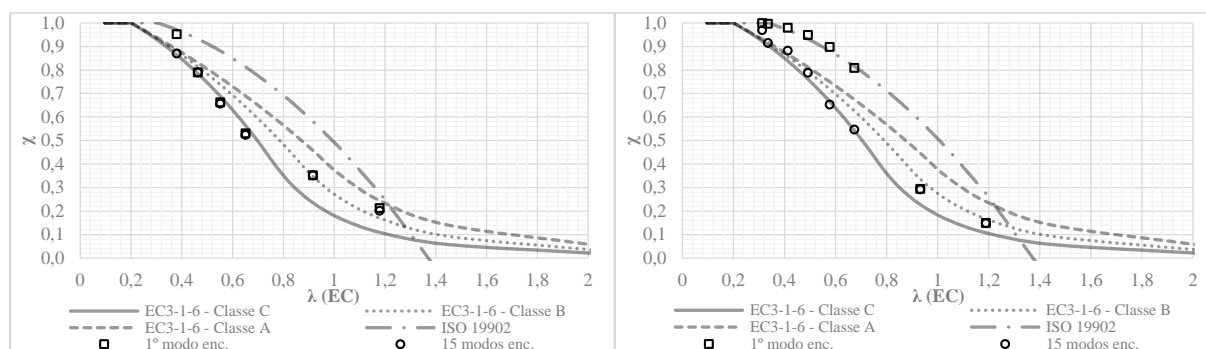


Fig. 6: Encurvadura local – EC3-1-6 vs. ISO 19902 vs. GMNIA (imperfeições classe C do EC3-1-6)
Esq.: L = 5 m; Dir.: L = 10 m

3.2.2 Compressão axial - Encurvadura global

O EC3-1-1 e a ISO usam diferentes variáveis para definir as curvas de encurvadura global. A ISO utiliza na verificação desta encurvadura a tensão de cedência reduzida pelos fenómenos de encurvadura local (aspecto não considerado no EC3-1-1). Contudo, tendo em conta as secções transversais utilizadas nesta análise, a ISO indica que estas não são susceptíveis de sofrer fenómenos de encurvadura local, pelo que neste caso a verificação da encurvadura global é feita também utilizando a tensão de cedência. Por esta razão as curvas de encurvadura das duas normas podem ser agregadas num único gráfico (Fig. 7).

O comprimento efectivo dos elementos foi considerado com o valor de 1,0. A forma das imperfeições que interessa considerar para a análise dos fenómenos de encurvadura globais são dados pelo 1º modo de encurvadura. Os resultados numéricos apresentam-se na Tabela 5.

Da Fig. 7 verifica-se uma boa aproximação entre as curvas da ISO e do EC3-1-1 (curva “a”, $\alpha=0,21$), sendo que esta é ligeiramente mais conservativa para as esbeltezas intermédias.

Da Tabela 5 verifica-se que o valor da esbelteza calculada a partir dos resultados numéricos se começa a afastar da calculada pelas normas (iguais em ambas), à medida que estas aumentam. Este aspecto tem apenas como consequência a translação no gráfico, em relação às curvas, dos pontos da análise numérica de maior esbelteza para a esquerda.

As resistências verificam-se ser, de uma forma geral, mais próximas entre as normas e a análise numérica quando se considera como amplitude para as imperfeições o valor $L/500$. O

facto de para amplitudes de $L/250$ e $L/300$ os resultados numéricos obtidos serem inferiores aos da ISO parece indicar que a calibração das expressões desta norma foi feita tendo em conta valores de imperfeições mais reduzidos que os indicados pelo Eurocódigo.

Em termos de resistências finais verifica-se que, pelo facto de os coeficientes parciais de segurança da ISO serem superiores aos do EC3-1-1 (1,18 vs. 1,0), a ISO oferece valores consideravelmente mais conservativos para a encurvadura global. Além disso, verifica-se que a folga entre a resistência final no EC3-1-1 e os resultados numéricos é bastante reduzida. De facto verifica-se a existência de alguns valores ligeiramente abaixo dos determinados numericamente (no máximo -1,27%). No entanto, fazendo o dimensionamento destes elementos paralelamente pelo EC3-1-6 ($\gamma_{M1} = 1,1$) verifica-se que esta norma apresenta valores mais baixos que os numéricos (e por isso seguros). Este facto permite evidenciar que, em alguns casos, mesmo no campo de aplicação do EC3-1-1 a resistência final está a ser condicionada (de acordo com o EC3-1-6) por fenómenos locais.

Tabela 5: Resultados numéricos para a encurvadura global e comparação com o EC3-1-1 e a ISO a)

Teste N°	D_{ext} (m)	t (mm)	D/t	L (m)	A (cm ²)	F_{cr} (MN)	F_{pl} (MN)	λ (EC=ISO)	λ (Num)	Erro λ (%)
1	1,5	50	30	10	2277,7	1266,39	80,86	0,255	0,253	0,97
2	1,5	50	30	15	2277,7	608,73	80,86	0,383	0,364	5,01
3	1,5	50	30	20	2277,7	352,60	80,86	0,510	0,479	6,56
4	1,5	50	30	25	2277,7	228,83	80,86	0,638	0,594	7,30
5	1,25	50	25	25	1885,0	135,17	66,92	0,771	0,704	9,51
6	1	50	20	25	1492,3	71,01	52,98	0,973	0,864	12,63

Tabela 6: Resultados numéricos para a encurvadura global e comparação com o EC3-1-1 e a ISO b)

Teste N°	Imp. = L/500						Imp. = L/250				Imp. = L/300			
	χ_x (EC)	χ_x (ISO)	Δ_{w0} (mm)	χ_x (Num)	Dif. EC (%)	Dif. ISO (%)	Δ_{w0} (mm)	χ_x (Num)	Dif. EC (%)	Dif. ISO (%)	Δ_{w0} (mm)	χ_x (Num)	Dif. EC (%)	Dif. ISO (%)
1	0,988	0,982	20,00	0,987	-0,07	0,52	40,00	0,945	-4,29	-3,70	33,33	0,959	-2,92	-2,33
2	0,957	0,959	30,00	0,967	0,99	0,79	60,00	0,918	-3,94	-4,14	50,00	0,935	-2,24	-2,44
3	0,921	0,928	40,00	0,908	-1,27	-1,92	80,00	0,817	-10,38	-11,03	66,67	0,844	-7,67	-8,32
4	0,875	0,887	50,00	0,898	2,32	1,14	100,00	0,798	-7,72	-8,90	83,33	0,830	-4,48	-5,66
5	0,812	0,835	50,00	0,853	4,09	1,80	100,00	0,735	-7,72	-10,01	83,33	0,766	-4,59	-6,88
6	0,685	0,737	50,00	0,759	7,48	2,25	100,00	0,647	-3,74	-8,97	83,33	0,678	-0,63	-5,86

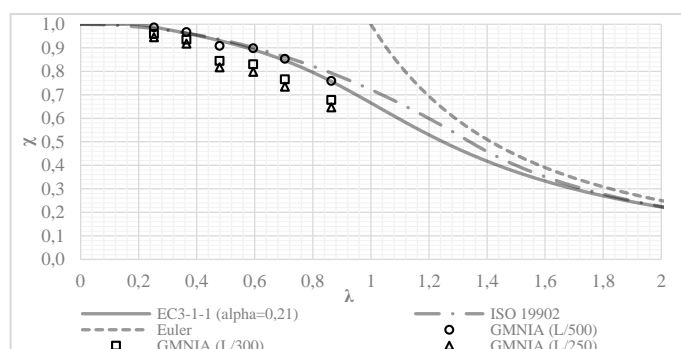


Fig. 7: Encurvadura global – EC3-1-1 vs. ISO 19902 vs. GMNIA

3.2.3 Pressão hidrostática

O procedimento relativamente às imperfeições consistiu, mais uma vez, em procurar os modos de encurvadura (neste caso nos 25 primeiros) que mais se aproximavam da deformação indicada pelo EC3-1-6 através do comprimento de referência circunferencial. O uso do pri-

meiro modo de encurvadura verificou-se ser demasiado conservativo, usando as amplitudes definidas pelo EC3-1-6, comparativamente à resistência dada por ambas as normas. A amplitude destas imperfeições corresponde ao maior valor de duas expressões, sendo uma influenciada principalmente pelo comprimento e a outra pela espessura. Contudo, verificou-se que para as espessuras maiores aqui consideradas o valor mais condicionante era o que dependia da espessura e este originava valores demasiado conservativos. Assim, foram também testados os tubos com o valor das imperfeições independentemente da espessura do elemento.

A verificação aos fenómenos de encurvadura circunferencial foi feita para comprimentos de 5 e 10 m, tendo-se verificado que o comprimento tem um impacto considerável na redução da resistência. Para o comprimento menor serão apenas apresentados os dados compilados no gráfico da Fig. 8. Para efectuar a sobreposição das curvas de ambas as normas adoptou-se, mais uma vez, como abcissa para o gráfico a esbelteza definida pelo EC3-1-6. Pela verificação dos resultados apresentados conclui-se que a classe C do EC3-1-6 se ajusta consideravelmente bem à curva da ISO.

No que concerne aos resultados numéricos verifica-se que a utilização do primeiro modo de encurvadura resulta em valores demasiado conservativos para as esbeltezas mais baixas em qualquer uma das normas, mesmo com a utilização das imperfeições calculadas como independentes da espessura. Contudo, a pesquisa dos modos superiores conduziu a resultados numéricos que se aproximam bem de ambas as normas. Existe, contudo, uma pequena ressalva para a espessura maior do elemento mais comprido relativamente à ISO. As esbeltezas mais reduzidas calculadas numericamente afastam-se das calculadas pelo EC. A razão deste desvio deve-se o facto de os elementos de casca não serem os mais indicados para secções pouco esbeltas. Por esta razão, esses elementos foram também analisados recorrendo a elementos sólidos, tendo-se concluído que desta forma a esbelteza numérica já se aproximava dos valores das normas, contudo as diferenças relativamente às resistências obtidas são desprezáveis.

Fazendo uso dos coeficientes parciais de segurança conclui-se que a ambas as normas apresentam dimensionamentos seguros. De facto, a ISO oferece valores conservativos mesmo quando aplicada fora dos limites estabelecidos pela mesma.

Tabela 7: Resultados numéricos para a encurvadura circunferencial devido à pressão hidrostática e comparação com o EC3-1-1 e a ISO (L=10 m) a)

Teste N°	D _{ext} (m)	t (mm)	A (cm ²)	Δ _{w0} (EC) (mm)	Δ _{w0} (EC ind. t) (mm)	P _{cr} (MPa)	P _{pl} (MPa)	σ _{θRcr} (MPa)	λ (EC)	λ (Num)
1	1,5	100	4398,2	62,50	18,56	132,52	47,33	927,65	0,537	0,619
2	1,5	50	2277,7	31,25	18,56	20,75	23,67	300,86	1,031	1,086
3	1,5	25	1158,5	18,56	18,56	4,18	11,83	123,26	1,651	1,697
4	1,5	15	699,8	18,56	18,56	1,32	7,10	65,35	2,397	2,331
5	1,5	10	468,1	18,56	18,56	0,43	4,73	31,98	3,252	3,332
6	1,5	5	234,8	18,56	18,56	0,08	2,37	11,65	5,473	5,519

Tabela 8: Resultados numéricos para a encurvadura circunferencial devido à pressão hidrostática e comparação com o EC3-1-1 e a ISO (L=10 m) b)

Teste N°	1° modo			1° modo (Imp. indep. t)			25 modos (Imp. indep. t)					
	χ _θ (EC)	χ _θ (ISO)	χ _θ (Num)	Dif. EC (%)	Dif. ISO (%)	χ _θ (Num)	Dif. EC (%)	Dif. ISO (%)	Modo	χ _θ (Num)	Dif. EC (%)	Dif. ISO (%)
1	0,885	0,979	0,379	-50,69	-60,06	0,676	-20,94	-30,31	15	0,876	-0,97	-10,34
2	0,473	0,562	0,264	-20,93	-29,85	0,341	-13,26	-22,18	18	0,516	4,28	-4,64
3	0,183	0,176	0,192	0,89	1,63	0,192	0,89	1,63	12	0,241	5,72	6,46
4	0,087	0,084	0,098	1,12	1,47	0,098	1,12	1,47	12	0,149	6,16	6,51
5	0,047	0,051	0,054	0,71	0,38	0,054	0,71	0,38	15	0,087	3,98	3,65
6	0,017	0,018	0,021	0,41	0,29	0,021	0,41	0,29	15	0,038	2,12	2,00

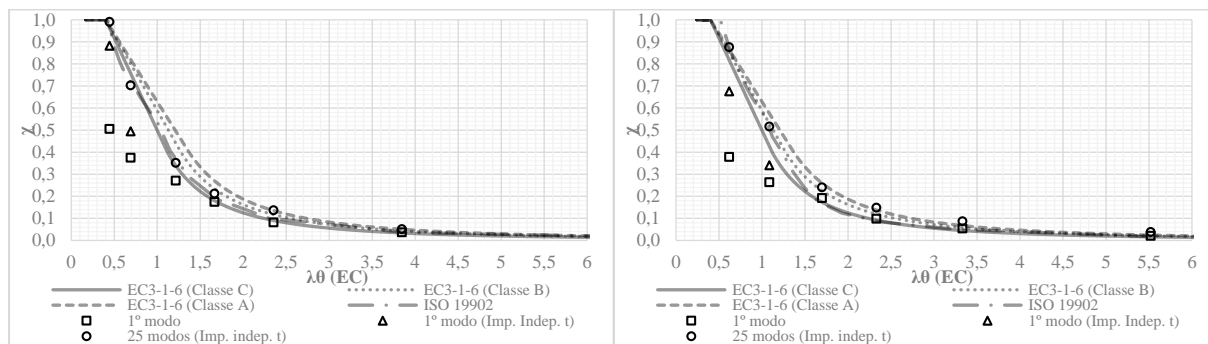


Fig. 8: Encurvadura circunferencial – EC3-1-6 vs ISO 19902 vs GMNIA (imperfeições classe C do EC3-1-6); Esq.: $L = 5$ m; Dir.: $L = 10$ m

4. Conclusões

Algumas das principais conclusões resultantes da elaboração deste trabalho são:

- A ISO oferece valores seguros, utilizando as imperfeições definidas pelo EC3-1-6, relativamente aos fenómenos de encurvadura local por compressão apenas para o campo de aplicação estabelecido na norma.
- A utilização do EC3-1-6 para a verificação dos fenómenos de encurvadura local por compressão verifica-se ser segura além dos limites de aplicação da ISO ($D/t < 120$).
- A utilização de amplitudes de imperfeições $e_0/L = 1/300$ e $1/250$ definidas no EC3-1-1 para a curva de encurvadura a , verificou-se oferecer valores numéricos inferiores aos dados tanto por esta norma como pela ISO. Para estes elementos a amplitude que melhor se ajustou às curvas de encurvadura global corresponde ao valor $L/500$.
- Em alguns casos, verificou-se que o EC3-1-6 apresenta valores mais conservativos que o EC3-1-1, mesmo em classes anteriores à classe 4. Assim, o EC3 oferece valores seguros (para imperfeições de $L/500$) quando verificada a resistência por ambas as partes do EC3.
- À custa dos seus coeficientes parciais de segurança a ISO oferece valores seguros relativamente aos fenómenos de encurvadura global para as imperfeições do EC3-1-1.

5. Referências bibliográficas

- [1] Idrus, A., Potty, N. and Nizamani, Z. “Tubular strength comparison of offshore jacket structures under API RP2A and ISO 19902”, Perak, Malaysia, 2010.
- [2] HSE “Comparison of tubular member strength provisions in codes and standards”, Offshore Technology Report 2001/084, United Kingdom, 2001.
- [3] Tuen, E. "Structural resistance safety level in Eurocode versus Norsok and ISO", Master thesis, University of Stavanger - Faculty of Science and Technology, Stavanger, 2012.
- [4] Steck, M. “Comparison of internacional regulations with regard to the archived bearing capacity of structural members”, Germanischer Lloyd, Hamburg, n.d..
- [5] Rotter, J. and Schmidt, H. “Buckling of Steel Shells – European Design Recommendations”, Ed. 5, ECCS Press - P125, Brussels. 91-9147-000-92, 2008.
- [6] Chen, W. and Ross, D. “The Strength of Axially Loaded Tubular Columns - Tests of Fabricated Tubular Columns”. Fritz Engineering Laboratory Report No. 393.8, Lehigh University, Pennsylvania, 1978.
- [7] Marzullo, M. e Ostapenko, A. “Tests on Two High-strength Short Tubular Columns”, Fritz Engineering Laboratory Rep. No. 406.10, Lehigh University, Pennsylvania, 1977.
- [8] Windenburg, D. e Trilling, C. “Collapse by Instability of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure”, ASME, Transactions Vol.34, No. 11, Washington, 1934.