



III CONGRESSO LUSO-AFRICANO DE
Construção Metálica
Sustentável

Avaliação de ligações tubulares de estruturas offshore de acordo com as normas Norsok N004, ISO 19902 e Eurocódigo 3

Miguel Moya^a, Constança Rigueiro^b, João Pedro Martins^a 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. No presente artigo apresenta-se o comportamento mecânico de ligações de perfis tubulares comumente utilizados em estruturas offshore. As normas Norsok N-004, ISO 19902 e Eurocódigo 3 (EC3) Parte 1-8 são utilizadas para a determinação da resistência das ligações. Diferentes configurações de ligações planares são utilizadas, nomeadamente X, Y e K. Uma análise elásto-plástica das ligações é efectuada recorrendo a um software comercial de elementos finitos, determinando-se curvas força/deslocamento e momento/rotação. Este estudo permite concluir que as normas determinam valores conservadores para reduzidos valores de esbelteza dos tubos e que a utilização do EC3 está condicionada aos limites indicados na norma.

1. Introdução

A análise, dimensionamento e construção de estruturas offshore é possivelmente uma das tarefas mais exigentes da engenharia. Estas estruturas estão sujeitas a acções excepcionais, para além das que as estruturas onshore são dimensionadas para verificarem a segurança. As estruturas de aço com elementos tubulares são estruturas comumente utilizadas neste domínio, definidas por elementos principais e de contraventamento que se conectam com diferentes configurações designadas por K, Y e X. Este artigo apresenta um estudo da capacidade resistente de ligações planares, com diferentes configurações K, Y e X. As normas do domínio da engenharia offshore foram utilizadas, nomeadamente as normas Norsok N-004 [1], ISO 19902 [2] e os seus resultados comparados com os obtidos com o Eurocódigo 3 Parte 1-8 [3]. De modo a analisar a capacidade resistente das ligações, uma análise elásto-plástica do comportamento das ligações foi efectuada recorrendo a um software comercial de elementos finitos, ABAQUS [4]. Um estudo paramétrico com as características geométricas das ligações foi implementado nas diferentes tipologias X, Y e K.

2. Ligações Tubulares

As ligações tubulares são definidas na intersecção dos diferentes elementos tubulares, podem tomar configurações complexas, e usualmente estão sujeitas a elevadas tensões.

Uma ligação tubular simples é definida pelas características geométricas representadas na Fig. 1, onde: 1. Braço ou diagonal; 2. Reforço do braço (se existente); 3., 4. e 5. parâmetros geométricos relativos à junta do braço com a corda; 6. Corda; 7. Reforço da corda; 8. Offset - distância entre os eixos das diagonais, medida na intersecção com o eixo da corda; 9. Excêntrica; θ ângulo entre os eixos da corda e do braço e g a distância entre braços.

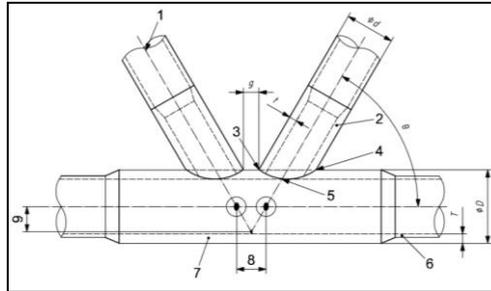


Fig. 1: Ligação tubular simples, ISO 19902, [2].

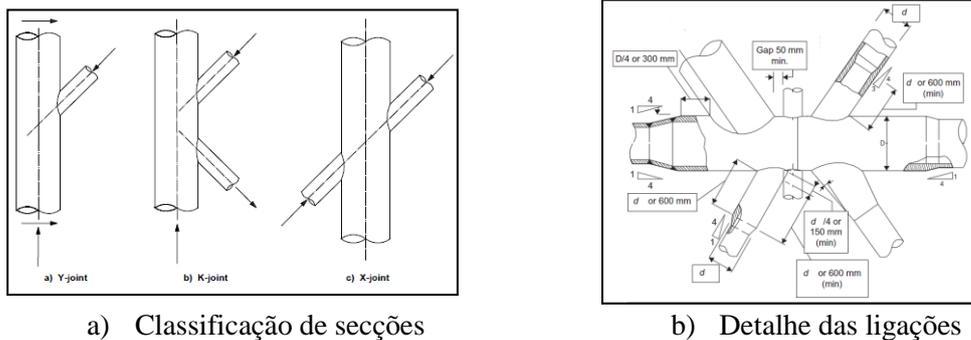
Outros parâmetros são ainda considerados para a definição da geometria da ligação, nomeadamente:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \gamma = \frac{D}{2T} \quad \tau = \frac{t}{T} \quad (1)$$

onde t é a espessura do braço, T é a espessura da corda, medidas na intersecção; d é o diâmetro do braço e D é o diâmetro da corda.

2.1 Classificação das ligações e detalhe das ligações

Geralmente as ligações tubulares planas dividem-se em três tipologias, X, Y e K, ver Fig. 2 a). Conforme é descrito na ISO 19902 [2], cada uma destas tipologias tem o seu próprio comportamento, como a seguir se descreve:



a) Classificação de seções

b) Detalhe das ligações

Fig. 2: Ligações tubulares simples, ISO 19902, [2].

A ligação-Y é definida por uma corda e um braço. A força axial existente no braço é equilibrada na corda por uma força axial e uma força de corte. A ligação-K é definida por uma corda e dois braços para o mesmo lado. As componentes normais à corda, das forças existentes nas diagonais equilibram-se entre elas, enquanto as componentes paralelas à corda se somam e são equilibradas na corda. A ligação-X é definida por uma corda e dois braços, um para cada lado da corda, onde o segundo braço é a continuação do primeiro. A força axial existente num braço é transferida pela corda para o outro braço sem qualquer reacção na corda. Muitas ligações são a combinação das três tipologias acima identificadas, misturando o comportamento

num plano ou em diversos planos. Notar que a classificação Y, K e X é apenas baseada na consideração de forças axiais nos braços.

O detalhe da ligação é essencial para o seu dimensionamento, conforme descrito na ISO 19902 [2] e na Norsok N-004 [1]. Quando é necessário considerar reforços na corda e nos braços, existem limites a satisfazer na ligação, conforme a Fig. 2 b) representa.

3. Dimensionamento de Ligações Tubulares segundo as normas

Na sua generalidade o cálculo da resistência das ligações tubulares em aço nas normas Norsok N-004, ISO 19902 e o Eurocódigo 3 Parte 1-8, segue três passos: i) Limites de validade geométrica para aplicação das normas ii) A capacidade da ligação (identificando-se as forças/momentos resistentes, os efeitos geométricos, os efeitos das tensões, a interacção dos esforços); iii) Limites geométricos e iii) Detalhe da ligação.

3.1 Limites de validade

A Norsok N-004 [1] e a ISO 19902 [2] só poderão ser aplicadas caso os seguintes limites se verifiquem:

Tabela 1: Limites de validade – Norsok N-004 [1] e ISO 19902 [2].

Norma	Limites
Norsok N-004/ISO 19902	$0.2 \leq \beta \leq 1.0$ $10 \leq \gamma \leq 50$ $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
Norsok N-004	ainda para as ligações K - $\frac{g}{D} \geq -0.6$
ISO 19902	ainda para as ligações K - $g \cdot T > -1.2\gamma$

O Eurocódigo 3 Parte 1-8 define que as secções consideradas deverão ser de classe 1 ou 2 e os seguintes limites geométricos: $10 \leq 2\gamma \leq 50$. Onde β , γ e θ são os coeficientes inerentes às características geométricas das ligações definidos na equação (1).

3.2 Esforços resistentes

Na Norsok N-004 [1] e na ISO 19902 [2] a capacidade resistente das ligações ao esforço axial e ao momento flector é definida do seguinte modo:

Tabela 2: Esforço axial e momento flector resistente – Norsok N-004 [1] e ISO 19902 [2].

Norma	M_{Rd} (kNm)	N_{Rd} (kN)
Norsok N-004	$M_{Rd} = \frac{f_y T^2}{\gamma_M \sin \theta} Q_u Q_f$	$N_{Rd} = \frac{f_y T^2}{\gamma_M \sin \theta} Q_u Q_f$
ISO 19902	$M_{Rd} = \frac{f_y T^2 d}{\gamma_{R,j} \sin \theta} Q_u Q_f$	$N_{Rd} = \frac{f_y T^2}{\gamma_{R,j} \sin \theta} Q_u Q_f$

Onde Q_u é designado como “strength factor”; Q_f “chord action factor”; T espessura da corda; γ_M coeficiente parcial de segurança de valor igual a 1.15; f_y tensão de cedência; θ o ângulo entre os eixos da corda e do braço e $\gamma_{R,j}$ coeficiente parcial de segurança de valor igual a 1.05.

3.3 Efeitos geométricos – Factor Q_u

Na Norsok N-004 [1] e na ISO 19902 [2] a definição deste factor depende da tipologia da ligação, X, Y ou K, e dos esforços actuantes existentes. Onde Q_β é designado como factor geométrico e Q_g “gap factor”, cujas formulações a seguir se indicam na Tabela 4.

Tabela 3: Valores para o Q_u – Norsok N-004 [1] e ISO 19902 [2].

Norma	Tipo de ligação	Esforço axial +	Esforço axial -	Flexão no plano	Flexão fora do plano
Norsok N-004	K	$\min \left\{ \begin{array}{l} (16 + 1.2\gamma)\beta^{1.2}Q_g \\ 40\beta^{1.2}Q_g \end{array} \right.$			
	Y	30β	$\min \left\{ \begin{array}{l} 2.8 + (20 + 2.8 + 3 \\ + 0.7\gamma)\beta^{1.2} \end{array} \right.$	5	$2.5 + (4.5 + 0.2\gamma)\beta^{2.6}$
	X	$6.4 \gamma^{(0.6\beta^2)}$	$(2.8 + (12 + 0.1\gamma)\beta)Q_\beta$		
ISO 19902	K	$(1.9 + 19\beta)Q_\beta^{0.5}Q_g$			
	Y	30β	$(1.9 + 19\beta)Q_\beta^{0.5}$	$4.5 \beta \gamma^{0.5}$	$3.2 \gamma^{(0.5\beta^2)}$
	X	23β for $\beta \leq 0.9$ $20.7 + (\beta - 0.9)(17\gamma - 220)$ for $\beta > 0.9$	$[2.8 + (12 + 0.1\gamma)\beta]Q_\beta$		

Tabela 4: Valores para o Q_β e Q_g – Norsok N-004 [1] e ISO 19902 [2].

Norma	Q_β	Q_g
Norsok N-004	$\begin{cases} \frac{0.3}{\beta(1 - 0.833\beta)} & \text{for } \beta > 0.6 \\ 1.0 & \text{for } \beta \leq 0.6 \end{cases}$	$\begin{cases} 1 + 0.2 \left(1 - \frac{2.8g}{D}\right)^3 & \text{for } \frac{g}{D} \geq 0.05, \text{ but } Q_g \geq 1.0 \\ 0.13 + 0.65\phi\gamma^{0.5} & \text{for } \frac{g}{D} \leq -0.05 \end{cases}$
ISO 19902		$\begin{cases} 1.9 - 0.7\gamma^{-0.5} \left(\frac{g}{T}\right)^{0.5} & \text{for } \frac{g}{T} \geq 2.0, \text{ but } Q_g \geq 1.0 \\ 0.13 + 0.65\phi\gamma^{0.5} & \text{for } \frac{g}{T} \leq -2.0 \end{cases}$

onde

$$\phi = \frac{t \cdot f_{y, \text{brace}}}{T \cdot f_{y, \text{chord}}} \quad (2)$$

3.4 Efeitos das tensões – Factor Q_f

Na Norsok N-004 [1] e na ISO 19902 [2] os efeitos das tensões são quantificados tomando o factor Q_f , conforme a Tabela 5 indica:

Tabela 5: Valores para o Q_f – Norsok N-004 [1] e ISO 19902 [2].

Norma	Q_f
Norsok N-004	$Q_f = 1.0 + C_1 \frac{\sigma_{a, Sd}}{f_y} - C_2 \frac{\sigma_{my, Sd}}{1.62f_y} - C_3 A^2$
ISO 19902	$Q_f = 1.0 - \lambda q_A^2$

Onde o parâmetro A é definido por:

$$A^2 = \left(\frac{\sigma_{a,Sd}}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{my,Sd}^2 + \sigma_{mz,Sd}^2}{1.62 f_y^2}\right) \tag{3}$$

Onde : $\sigma_{a,Sd}$, corresponde à tensão na corda devido ao esforço axial, positiva em tracção; $\sigma_{my,Sd}$, tensão na corda devido ao esforço de flexão no plano; $\sigma_{mz,Sd}$, tensão na corda devido ao esforço de flexão fora do plano; f_y , tensão de cedência.

Onde o parâmetro q_A é definido por:

$$q_A = \left[C_1 \left(\frac{P_C}{P_y}\right)^2 + C_2 \left(\frac{M_C}{M_p}\right)_{ipb}^2 + C_2 \left(\frac{M_C}{M_p}\right)_{opb}^2 \right]^{0.5} \gamma_{R,q} \tag{4}$$

Onde: *ipb* e *opb* correspondem ao esforço de flexão no plano e ao esforço de flexão fora do plano, respectivamente; P_C ao esforço axial na corda devido às acções; M_C ao momento flector na corda devido às acções; P_y resistência ao esforço axial, (pois $P_y = A \cdot f_y$); A secção transversal da corda na intersecção com o braço; M_p momento plástico da secção transversal da corda. Quanto ao valor de λ , este factor toma os valores seguintes: $\lambda=0.030$ para o braço sujeito a esforço axial; $\lambda=0.045$ para o braço sujeito a esforço de flexão no plano e $\lambda=0.021$ para o braço sujeito a esforço de flexão fora do plano.

A definição dos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 dependem da tipologia e do tipo de carga actuante da ligação.

Tabela 6: Valores para C_1 , C_2 e C_3 – Norsok N-004 [1] e ISO 19902 [2].

Norma	Tipo de ligação	C_1	C_2	C_3	
Norsok N-004	K - sujeitas a esforço axial equilibrado	0.2	0.2	0.3	
	T/Y - braço com esforço axial	0.3	0	0.8	
	X - braço sujeito a esforço axial de tracção	$\beta \leq 0.9$	0	0	0.4
		$\beta = 1.0$	0.2	0	0.2
	X - braço sujeito a esforço axial de compre	$\beta \leq 0.9$	0	0	0.4
		$\beta = 1.0$	-0.2	0	0.2
Todos os outros tipos de ligações braços à flexão		0.2	0	0.4	
ISO 19902	Y – braço com esforço axial	25	11	-	
	X - braço com esforço axial	20	22	-	
	K - sujeitas a esforço axial equilibrado	14	43	-	
	Todos os outros tipos de ligações braços à flexão		25	43	-

3.5 Detalhes das ligações

A Norsok N-004 [1] e a ISO 19902 [2] têm em conta nas suas formulações o incremento de resistência das ligações quando é considerado um aumento da espessura da corda na zona da ligação, nomeadamente:

$$N_{Rd} = \left[r + (1 - r) \left(\frac{T_n}{T_c}\right)^2 \right] N_{can,Rd} \tag{5}$$

em que r é definido por:

$$r = \begin{cases} \frac{L_c}{2.5D} & \text{for } \beta \leq 0.9 \\ (4\beta - 3) \frac{L_c}{1.5D} & \text{for } \beta > 0.9 \end{cases} \tag{6}$$

onde $N_{can,Rd} = N_{Rd}$ definido na Tabela 1; T_n corresponde à espessura da corda; T_c à espessura da corda reforçada e L_c o comprimento total efectivo dependente do diâmetro dos braços que intersectam a corda.

Apesar de ser muito comum o reforço das ligações recorrendo ao aumento da espessura da corda, o Eurocódigo 3 Part 1-8 [3] não tem este efeito em conta.

3.6 Interação dos esforços no braço

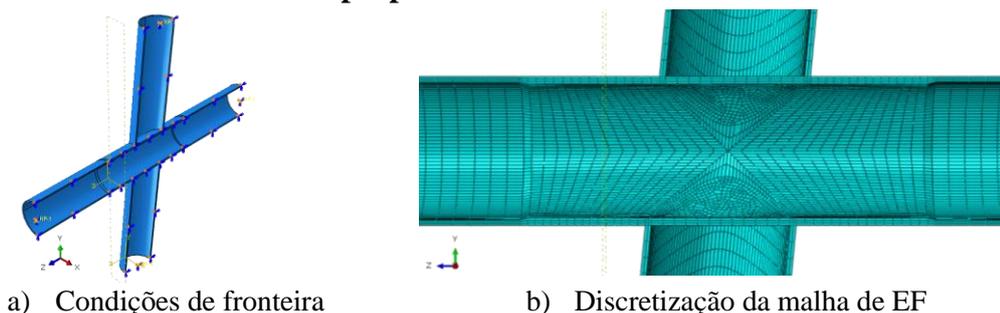
A resistência de cada braço da ligação, sujeito à flexão e a esforço axial, tem de verificar a condição, Norsok N-004 [1], a ISO 19902 [2] e Eurocódigo 3 Part 1-8 [3]:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)_{ipb}^2 + \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)_{opb} \leq 1.0 \quad (7)$$

Onde o significado de *ipb* e *opb* foi explicado no item 3.4.

4. Modelo numérico

4.1 Descrição do modelo numérico e propriedades do material



a) Condições de fronteira

b) Discretização da malha de EF

Fig. 3: Modelo numérico com pormenor da ligação, Moya, [6].

De modo a analisar o comportamento não linear das ligações-X, Y e K, foram desenvolvidos no software ABAQUS [4] vários modelos numéricos. Previamente procedeu-se à validação do cálculo numérico recorrendo a um exemplo existente na bibliografia, conforme descrito em Moya [6]. Os modelos desenvolvidos foram elaborados com elementos sólidos tetraédricos C3D8R. Tendo em consideração a simetria existente no plano perpendicular ao eixo xx, apenas se simula metade da geometria dos elementos. Desta forma, são requeridas as seguintes condições de fronteira: i) bloqueio dos deslocamentos segundo a direcção xx na superfície de simetria e, ii) bloqueio dos deslocamentos e rotações nas direcções yy, zz e zz nos extremos dos braços e da corda, Fig. 3a). Na zona da ligação, onde são esperados maiores gradientes de tensões, recorre-se a uma malha de elementos mais fina, assegurando sempre um mínimo de 3 elementos para a discretização da espessura da corda, Fig. 3b). A relação constitutiva não-linear do material é considerada no modelo através da lei de Ramberg-Osgood, [4]. O material admitido para as ligações foi o aço S355.

5. Estudo paramétrico

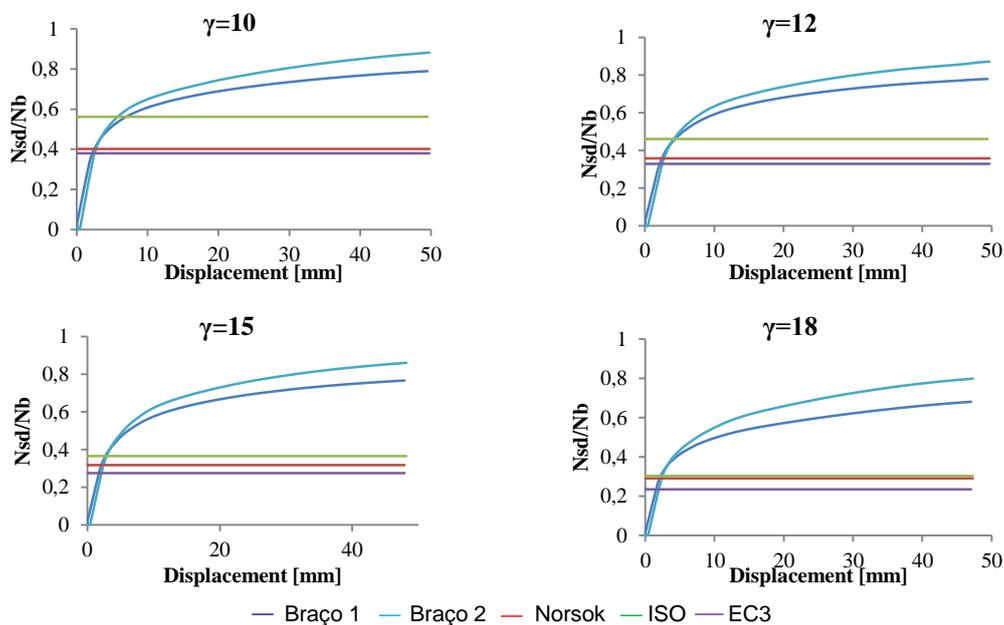
Neste item efectua-se um estudo paramétrico para as ligações planares de configuração X, Y e K. O parâmetro analisado nesta parametrização é o coeficiente γ , definido pela razão entre o diâmetro e a espessura da corda, Eq. (1).

Atendendo aos limites de validade apresentados no item 3.1, o parâmetro γ é analisado entre 10 e 50, pormenorizando o estudo na gama entre 10 e 20. O factor β , Eq. (1) é mantido constante e igual a 0.8 para as ligações K e Y e igual a 1 para a ligação X. Para a condição inicial de carregamento das ligações, considerou-se para a ligação K a corda sujeita a esforço axial de $N_{corda}/A \cdot f_y \sim 0.15$, para a ligação Y a corda sujeita a esforço axial de $N_{corda}/A \cdot f_y \sim 0.30$ e por último para a ligação X a corda sujeita a esforço axial de $N_{corda}=A \cdot f_y$. Quanto à geometria das ligações estão detalhadas na Tabelas 7.

Tabela 7: Caracterização da ligação-K e ligação-Y.

γ	T [mm]	t [mm]	Axial load in chord [N]			T_{can} [mm]	T_{nom} [mm]	Chord Area [mm ²]	
			Ligação K	Ligação Y	Ligação X			Ligação K e Y	Ligação X
10	20	20	$-1.30 \cdot 10^6$	$-2.51 \cdot 10^6$	$3.38 \cdot 10^7$	45.0	25.0	23876.10	68722.34
12	16.6	16.6	$-1.06 \cdot 10^6$	$-2.13 \cdot 10^6$	$2.44 \cdot 10^7$	37.5	25.0	19994.48	68722.34
15	13.3	13.3	$-8.60 \cdot 10^5$	$-1.72 \cdot 10^6$	$1.96 \cdot 10^7$	30.0	20.0	16157.56	55292.03
18	11.1	11.1	$-7.22 \cdot 10^5$	$-1.44 \cdot 10^6$	$1.77 \cdot 10^7$	25.0	18.0	13561.60	49875.92
20	10	10.0	$-6.52 \cdot 10^5$	$-1.30 \cdot 10^6$	$1.48 \cdot 10^7$	22.5	15.0	12252.21	41704.64
30	6.6	6.6	$-4.34 \cdot 10^5$	$-8.69 \cdot 10^5$	$9.93 \cdot 10^6$	15.0	10.0	8156.96	27960.17
40	5.0	5.0	$-3.30 \cdot 10^5$	$-6.61 \cdot 10^5$	$7.96 \cdot 10^6$	11.25	8.0	6204.65	22418.41
50	4.0	4.0	$-2.65 \cdot 10^5$	$-5.30 \cdot 10^5$	$5.98 \cdot 10^6$	9.0	6.0	4976.28	16851.50

5.1 Resultados – Ligação-K

**Fig. 4:** Curvas força/deslocamento para $10 < \gamma < 18$.

Como se pode observar nos intervalos estudados todas as normas, excepto a ISO 19902 para $\gamma=10$, determinam valores conservadores dentro do comportamento elástico da ligação. A ISO 19902 [2] apresenta os maiores valores de resistência das ligações analisadas. Nos valores de γ compreendidos entre $20 < \gamma < 50$, observa-se que os valores obtidos por intermédio da Norsok N-004 [1] são muito idênticos aos obtidos com a ISO 19902 [2] e superiores aos obtidos pelo Eurocódigo 3 Parte 1-8 [3]. Para valores de γ superiores aos limites indicados no Eurocódigo 3 Parte 1-8 [3] a resistência da ligação, determinada por esta norma, é muito reduzida. Ainda no intervalo de valores de $20 < \gamma < 50$, observa-se que os valores determinados com as normas são muito inferiores à capacidade máxima em regime elástico. Estes resultados conservadores das normas poder-se-ão justificar pelo facto das secções transversais destas ligações para este intervalo de valores de γ serem muito esbeltas.

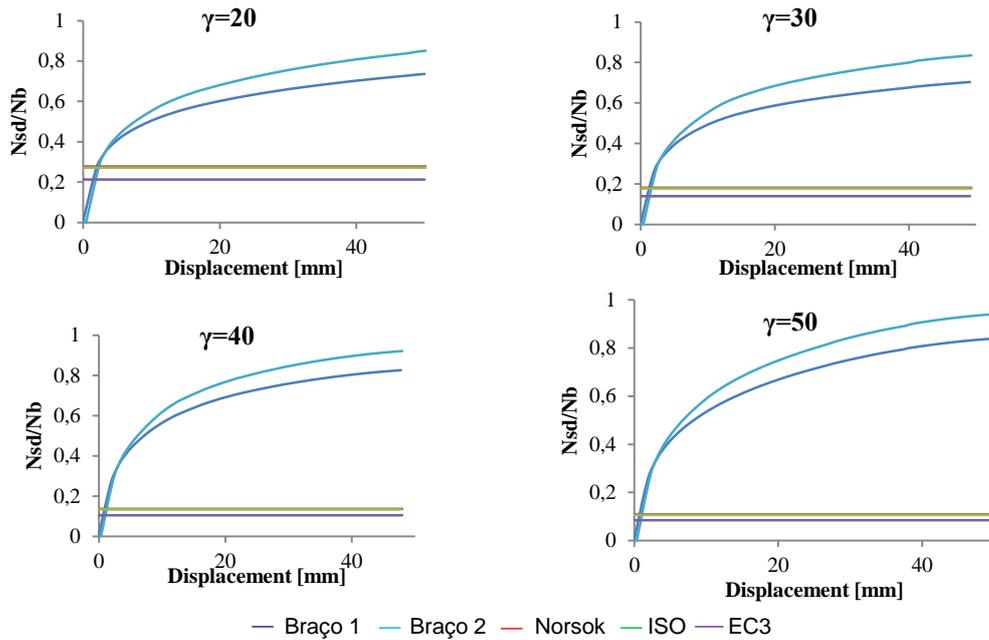


Fig. 5: Curvas força/deslocamento para $20 < \gamma < 50$.

5.2 Resultados – Ligação-Y

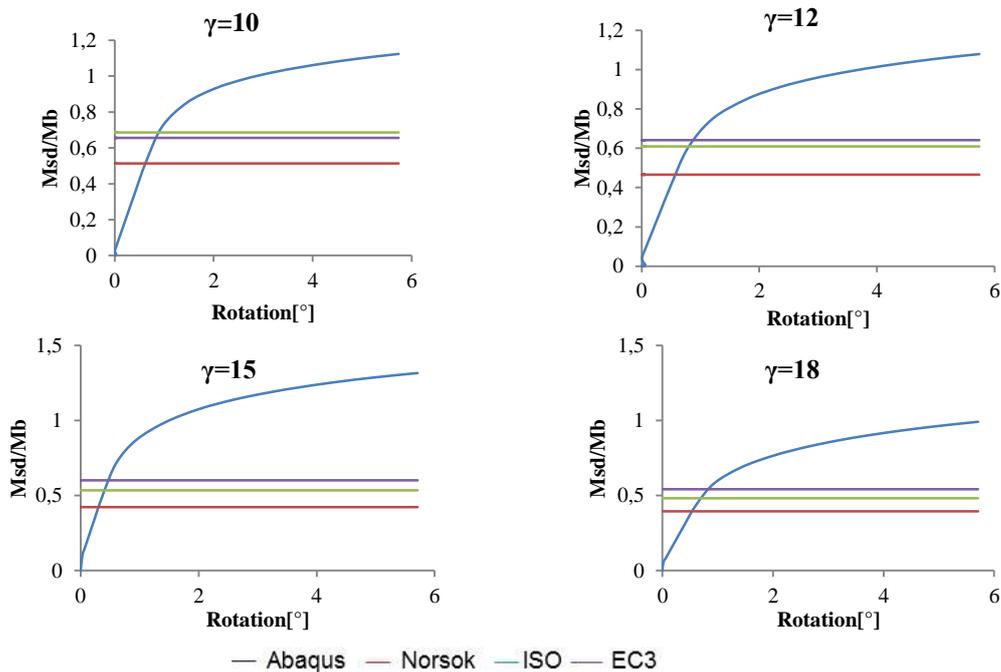


Fig. 6: Curvas Momento/rotação para $10 < \gamma < 18$.

Nos intervalos estudados todas as normas determinam valores conservadores dentro do comportamento elástico da secção transversal. A Norsok N-004 [1] apresenta os menores valores de resistência das ligações analisadas e com a menor variação do valor da resistência. Os valores determinados com as diferentes normas não apresentam a redução significativa, para valores crescentes de γ , observada na ligação K.

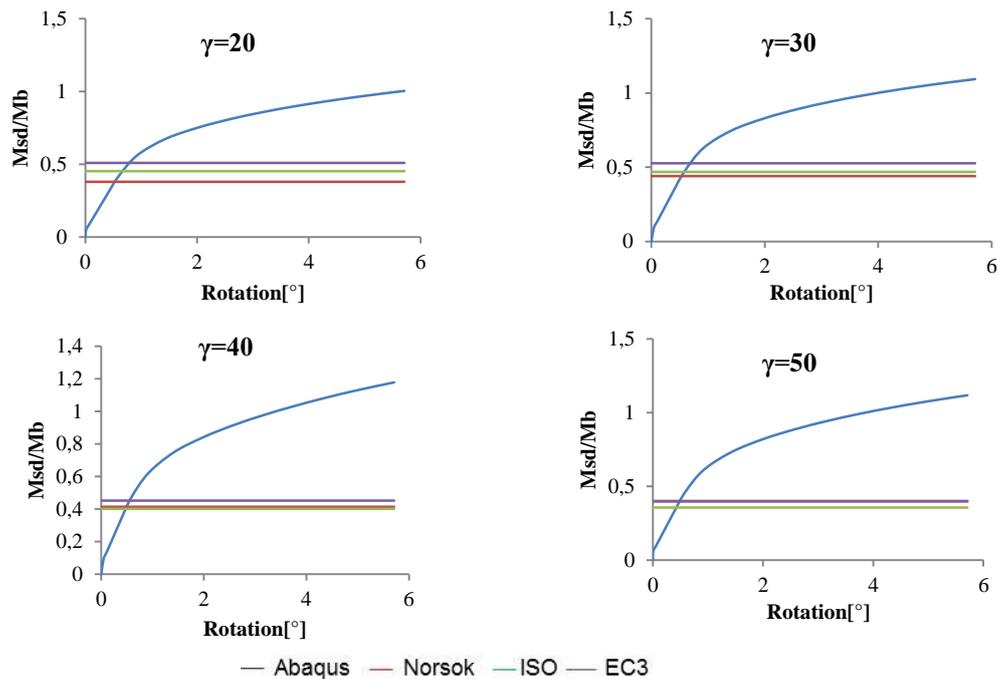


Fig. 7: Curvas Momento/rotação para $20 < \gamma < 50$.

5.3 Resultados – Ligação-X

Atendendo que o Eurocódigo 3 Parte 1-8 [3] não contempla a existência de reforço na ligação, os cálculos apresentados com esta norma são efectuados assumindo que a espessura da secção transversal da corda é constante para os valores assumidos com e sem reforço.

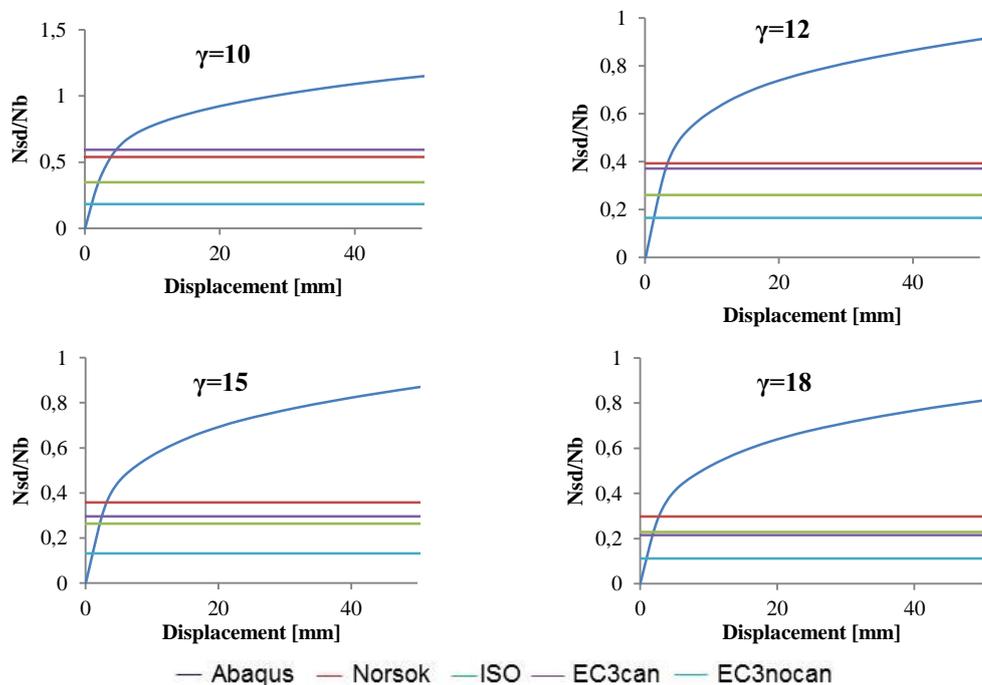


Fig. 8: Curvas força/deslocamento para $10 < \gamma < 18$.

De acordo com os resultados obtidos, constata-se que os valores determinados para a resistência da ligação com o Eurocódigo 3 Parte 1-8 [3], para valores de γ superiores a 20, são muito

reduzidos. Estes resultados definem a necessidade de se analisar comportamento da resistência das ligações com reforço recorrendo ao Eurocódigo 3 Parte 1-8 [3].

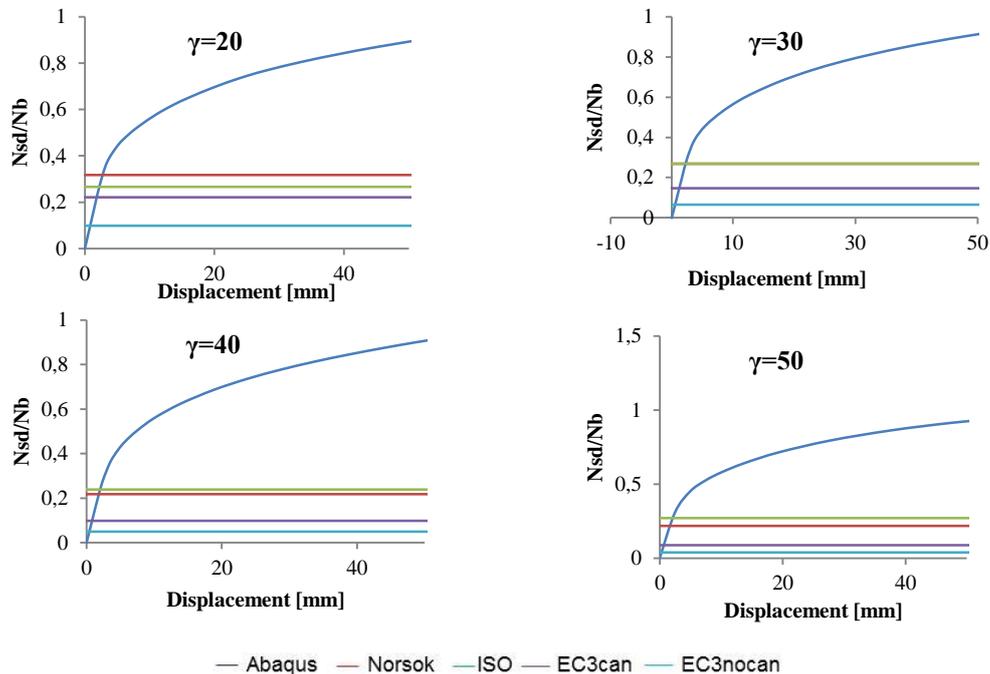


Fig. 9: Curvas força/deslocamento para $20 < \gamma < 50$.

6. Conclusões

Este artigo apresenta uma avaliação do comportamento de ligações planares de perfis tubulares, comumente utilizados na indústria offshore. As normas Norsok N-004, ISO 19902 e Eurocódigo 3 Parte 1-8 são utilizadas para a determinação da resistência das ligações, os resultados obtidos são comparados entre si. Uma análise não linear das ligações foi elaborada com o programa ABAQUS, possibilitando a determinação da resistência última das ligações. Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que: i) As normas determinam valores conservadores para a resistência das ligações; ii) A aplicabilidade do Eurocódigo 3 carece ser devidamente avaliada de modo a que as suas expressões possam: ter em conta a existência de reforço nas ligações; ser utilizadas para valores de γ superiores a 20.

Referências

- [1] NORSOK N-004, “Design of steel structures”. Norwegian petroleum industry, Norway, 2013.
- [2] ISO 19902, “Petroleum and natural gas industries –Offshore structures Part 2: Fixed steel structures”, International Standard, 2007.
- [3] EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-8: Design of joints, Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [4] Abaqus Theory Manual, v.6.11, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. USA, 2011.
- [5] El-Reedy, Mohamed A, “Offshore Structures. Design, Construction and Maintenance”. Gulf Professional Publishing, 2012.
- [6] Moya, M., “Assessment of the behaviour of tubular joints in offshore structures according to the standards Norsok N-004, ISO 19902 and Eurocode 3 Part 1-8”, Master Thesis at University of Coimbra, 2014.