



# AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE COLUNAS TUBULARES NAS LIGAÇÕES A VIGAS I COM PERFIS EM U INVERTIDOS SOLDADOS

Magalhães L<sup>a,\*</sup>, Rebelo C<sup>b</sup> e Jordão S<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *ISISE - Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco*

<sup>b</sup> *ISISE - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra*

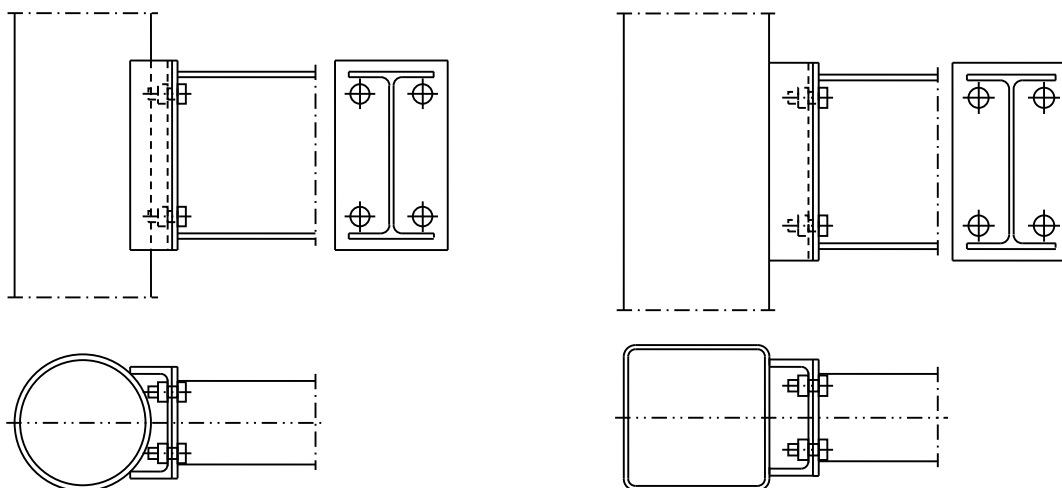
**Resumo.** O artigo apresenta resultados do estudo numérico relativo ao comportamento de colunas tubulares nas ligações a vigas I com perfis em U, efetuado com base numa variação paramétrica das características mais significativas dos perfis tubulares. Os parâmetros considerados são as espessuras, as larguras e os diâmetros das colunas tubulares, e o seu enchimento com betão. Os resultados do estudo paramétrico com os modelos numéricos permitem relacionar os parâmetros considerados com o comportamento estrutural da ligação, nomeadamente a resistência, as rigidezes e a capacidade de rotação. Dos resultados obtidos, conclui-se que a variação destes parâmetros altera significativamente o comportamento global da ligação.

## 1. Introdução

A utilização de perfis tubulares ainda não é uma solução corrente na conceção de estruturas metálicas e mistas, apesar da sua forma geométrica lhe conferir alta resistência e proporcionar uma redução de custos. Os aspetos associados com as ligações, principalmente a vigas de perfil em I, condicionam a sua utilização. As soluções tradicionais, aparafusada e soldada, ou são inviáveis por não haver acesso ao interior do perfil tubular ou tornam-se dispendiosas devido ao processo de soldadura em obra.

Devido a este fato, a investigação não se dirigiu para estas tipologias, resultando na inexistência de métodos de análise abrangentes ou códigos para o seu dimensionamento. O Eurocódigo 3 [1] fornece algumas regras para ligações soldadas entre perfis tubulares, mas nada indicando para as ligações aparafusadas. No entanto, o "Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire" CIDECT tem vindo a desenvolver investigação no sentido de colmatar essa lacuna [2]. A caracterização do comportamento de ligações entre perfis tubulares tem vindo a ser realizada na perspetiva do método das componentes, conduzindo a uma uniformização na metodologia regulamentar de dimensionamento de ligações metálicas.

O principal objetivo da investigação é a caracterização do comportamento destas ligações com perfis em U, invertidos, de secção soldada, soldados à coluna tubular e aparafusados à placa de topo da viga, como ilustra a Fig. 1. Este tipo de ligação constitui uma boa solução para contornar o problema referido, uma vez que têm um custo de construção razoável, são fáceis de implementar e apresentam bom comportamento quando sujeitas a ações cíclicas pela ductilidade obtida através da deformação da alma do perfil em U aliada à da coluna tubular.



**Fig. 1:** Esquemas das ligações viga-coluna CHS e SHS

Neste artigo são apresentados os resultados do estudo numérico relativo ao comportamento das colunas, efetuado com modelos de elementos finitos e com base numa variação paramétrica das características mais significativas dos perfis tubulares. Os parâmetros considerados na variação paramétrica são as espessuras, as larguras e os diâmetros das colunas tubulares, e o seu enchimento com betão. Os modelos numéricos foram desenvolvidos no programa de elementos finitos LUSAS, sendo utilizados elementos finitos sólidos, elementos casca e elementos mola.

Os resultados do estudo permitem relacionar os parâmetros considerados com o comportamento estrutural da ligação, nomeadamente na resistência, nas rigidezes e na capacidade de rotação.

## 2. Estudo paramétrico

As várias configurações das dimensões das colunas tubulares selecionadas para os modelos numéricos correspondem a uma variação paramétrica dos fatores de maior influência no seu comportamento estrutural, nomeadamente:

- Espessura;
- Largura (SHS);
- Diâmetro (CHS);
- Enchimento com betão.

As dimensões e características dos perfis tubulares dos modelos numéricos, parâmetros variáveis do estudo, estão indicadas na Tabela 1.

Nos modelos anteriores, o perfil em U, a viga IPE300 e a placa de extremidade mantêm sempre as mesmas características e dimensões, indicadas na Tabela 2. O modelo numérico com estas características e dimensões, no entanto sem considerar a coluna tubular, já foi ensaiado experimentalmente existindo também um modelo numérico associado, que se designa por A-13, e que é referido neste artigo para aferir o comportamento dos modelos, considerando neste exemplo que as colunas tubulares são rígidas e indeformáveis.

**Tabela 1:** Dimensões dos modelos numéricos

<i>P</i>	<i>Perfil</i>	$w_c$ [mm]	$d_c$ [mm]	$t_c$ [mm]	<i>Betão</i>	<i>Modelo</i> <i>(Referência)</i>
1	SHS	200		8	Não	S-001
2				10		S-002
3				12,5		S-003
4				15		S-004
5		220		8		S-021
6				10		S-022
7				12,5		S-023
8				15		S-024
9		240		8		S-041
10				10		S-042
11				12,5		S-043
12				15		S-044
13				8	Sim	S-141
14				10		S-142
15				12,5		S-143
16				15		S-144
17		260		8	Não	S-061
18				10		S-062
19				12,5		S-063
20				15		S-064
21	CHS	219,1	8	Sim		C-021
22			12,5			C-023
23			8			C-121
24			12,5			C-123
25		244,5	8	Não	C-041	
26			12,5		C-043	
27			8	Sim	C-141	
28			12,5		C-143	

**Tabela 2:** Dimensões dos elementos da ligação com os parâmetros fixos

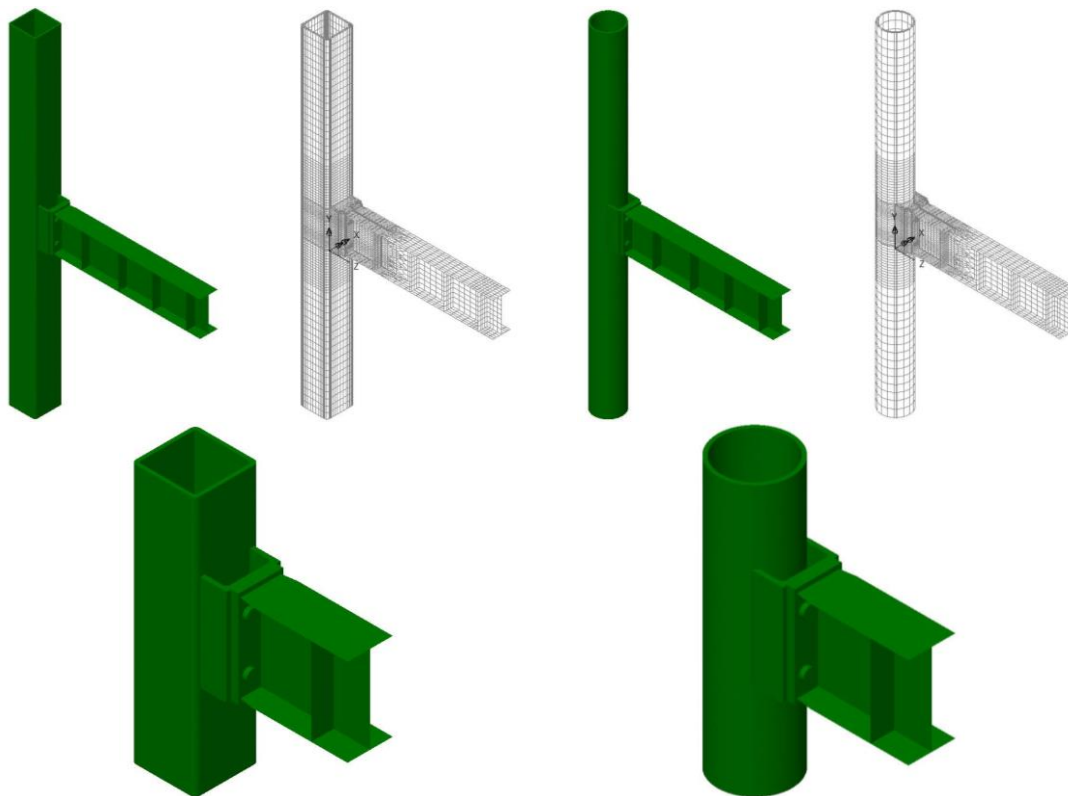
<i>P</i>	$p_2$ [mm]	$b_c$ [mm]	$h_c$ [mm]	$t_{wc}$ [mm]	$t_{fc}$ [mm]	<i>Modelo</i>	<i>Placa de extremidade</i>	
							$b_p$ [mm]	$e$ [mm]
3	85	90	185	15	15	A-13	155	35

### 3. Modelação de elementos finitos

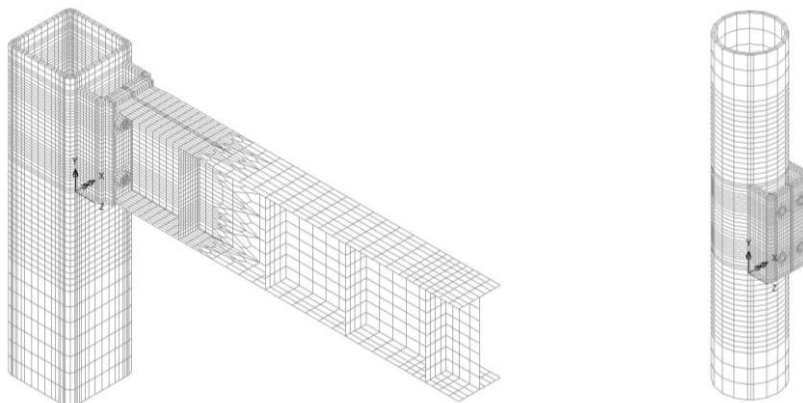
#### 3.1 Modelos

Os modelos de elementos finitos, representados na Fig. 2, caracterizam numericamente os protótipos dos ensaios experimentais a realizar, sendo constituídos pela coluna tubular, de secção quadrangular (SHS) ou circular CHS), pelo perfil em U de secção soldada (duas placas de banzo soldadas à placa da alma com 4 furos) soldado à coluna, e a viga em I, na qual é aplicada a carga, com placa de extremidade rasa que liga ao perfil em U com 4 parafusos.

Os modelos numéricos foram modelados considerando uma análise não-linear com incremento automático da carga. A Fig. 3 apresenta alguns pormenores da malha.



**Fig. 2:** Modelos de elementos finitos e pormenores dos modelos na zona da ligação

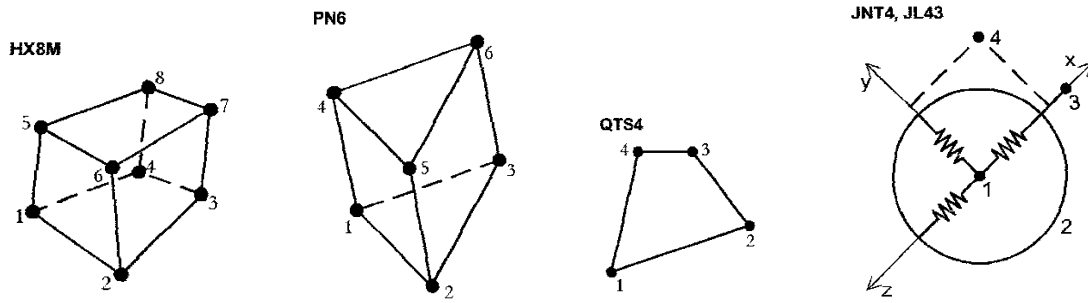


**Fig. 3:** Pormenores da malha de elementos finitos

Conforme se pode observar na Fig. 3 a malha de elementos finitos tem uma discretização mais apertada no perfil, nos parafusos, na placa de extremidade e nas zona da viga e da coluna mais próxima da ligação, sendo que nas mais afastadas se permite ter uma malha mais aberta, pretendendo-se com este detalhe aligeirar os modelos em benefício do tempo de cálculo numérico.

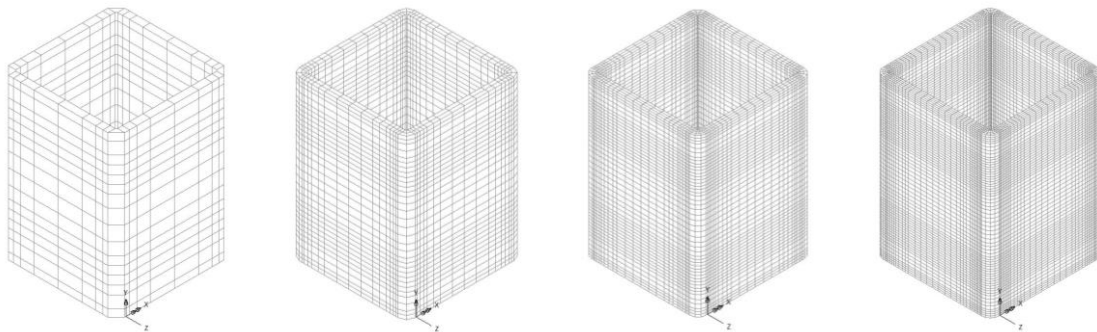
### 3.2 Elementos finitos

Para os elementos das colunas tubulares, do betão, do perfil em U, da placa de topo da viga e dos parafusos são utilizados elementos finitos sólidos HX8M e PN6, e para a viga, de forma a aligeirar os modelos, são utilizados elementos de casca QTS4 “*Thick Shell*”. A modelação das superfícies de contacto entre a placa de extremidade, alma do perfil em U e os parafusos, é efetuada com elementos mola JNT4, com elevada rigidez em compressão e muito baixa em tração. A formulação destes elementos finitos permite ter em conta os diversos esforços inclusive os de membrana. A Fig. 4 esquematiza a formulação dos elementos finitos utilizados [3].



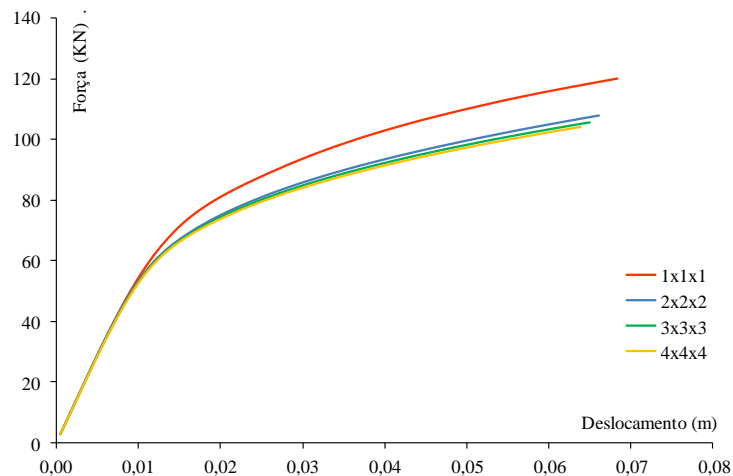
**Fig. 4:** Elementos finitos

Foi realizado um estudo de convergência da malha para definir o refinamento da malha de elementos finitos mais vantajoso em termos de cálculo. Foram analisadas quatro malhas que dividem cada elemento finito sólido em  $2 \times 2 \times 2$ ,  $3 \times 3 \times 3$  e  $4 \times 4 \times 4$ , com base num dos modelos de malha inicial não dividida, que se denominou de  $1 \times 1 \times 1$ , das quais se mostram na Fig. 5 pormenores da coluna tubular na zona da ligação.



**Fig. 5:** Malhas de elementos finitos usadas na convergência ( $1 \times 1 \times 1$ ,  $2 \times 2 \times 2$ ,  $3 \times 3 \times 3$  e  $4 \times 4 \times 4$ )

Para comparar os quatro modelos foram determinados os diagramas força-deslocamento, apresentados na Fig. 6.



**Fig. 6:** Comparação dos resultados para as diferentes malhas

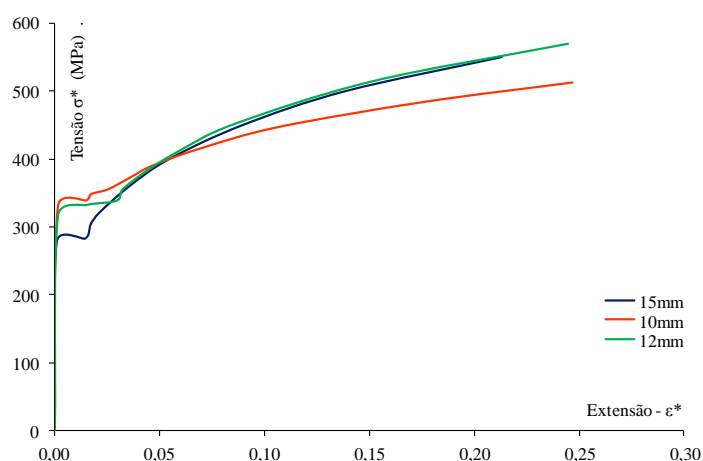
Verifica-se que os resultados concorrem na fase de comportamento elástico do modelo, e que relativamente à fase pós cedência a partir da malha  $2 \times 2 \times 2$  os resultados são praticamente coincidentes. Devido à convergência da malha se verificar a partir da malha de  $2 \times 2 \times 2$  foi considerada esta malha em todos os modelos.

### 3.3 Características dos aços

Na modelação foram considerados aços com diferentes características de comportamento elásto-plástico, de forma a calibrar os modelos numéricos com os resultados experimentais.

As características dos aços usados na modelação foram obtidas de ensaios uniaxiais de tração em provetes retirados das chapas usadas nos ensaios de componentes, para as espessuras de 10, 12 e 15mm. As curvas tensão-extensão obtidas tiveram de ser corrigidas para se considerar a secção reduzida dos provetes pela estrição [4], obtendo-se os diagramas da Fig. 7.

Para além dos elementos de aço constituintes do perfil em U, que têm comportamento não linear idêntico aos diagramas da Fig. 7, todos os outros elementos dos modelos numéricos têm resistência superior, para que as deformações plásticas se iniciem no perfil em U.

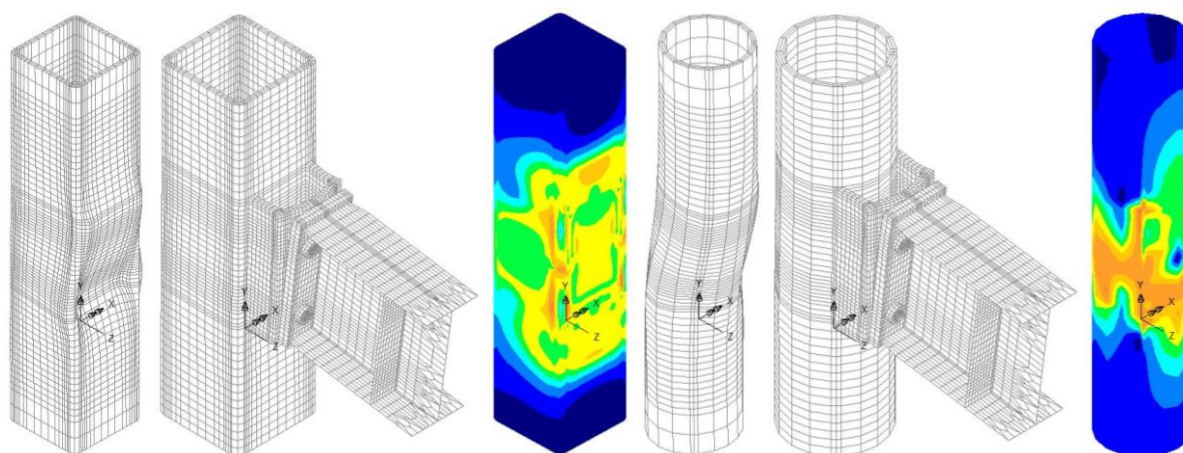


**Fig. 7:** Diagramas tensão-extensão dos aços

As colunas tubulares são modeladas considerando um aço S355, e no caso de serem completas, um betão da classe C20/25. A viga, de perfil IPE300, com grande rigidez à flexão [5] quando comparada com a do perfil em U, e a placa de topo com 25mm de espessura, têm também as características dum aço S355. Os parafusos M24 são da classe 10.9.

## 4. Resultados

Apresentam-se na Fig. 8 resultados em termos de deformação e de tensões de Von Mises.

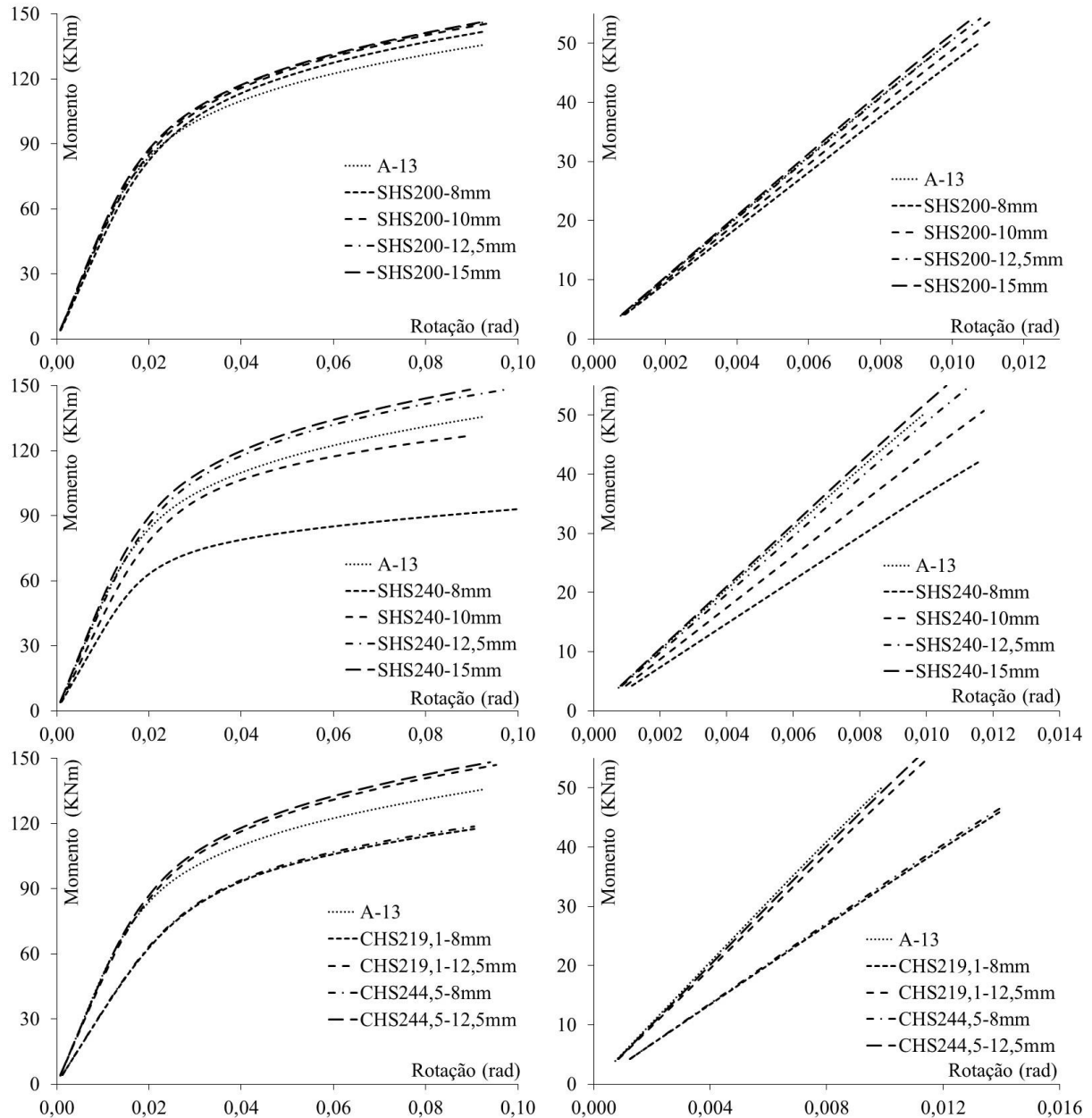


**Fig. 8:** Deformações e tensões de Von Mises para o último incremento de carga

A deformação dos perfis tubulares é causada pela tração dos banzos do perfil em U na zona superior e pela compressão na zona inferior. Em ambos os casos podem observar-se deformações plásticas significativas, verificando-se também que as deformações nos perfis tubulares são inferiores às causadas na alma do perfil em U. Relativamente às tensões é notório que são mais elevadas nas zonas periféricas de contacto com o perfil em U, decrescendo para as faces contrapostas a este perfil. Nas zonas afastadas da ligação à viga as tensões são mínimas.

Os resultados são apresentados em termos de curvas momento-rotação nas Fig. 9 a Fig. 12.

Na Fig. 9 são apresentadas as curvas momento-rotação, para a variação da espessura nos modelos SHS-200, SHS-240, CHS-219,1 e CHS-244,5, referenciados na Tabela 1.



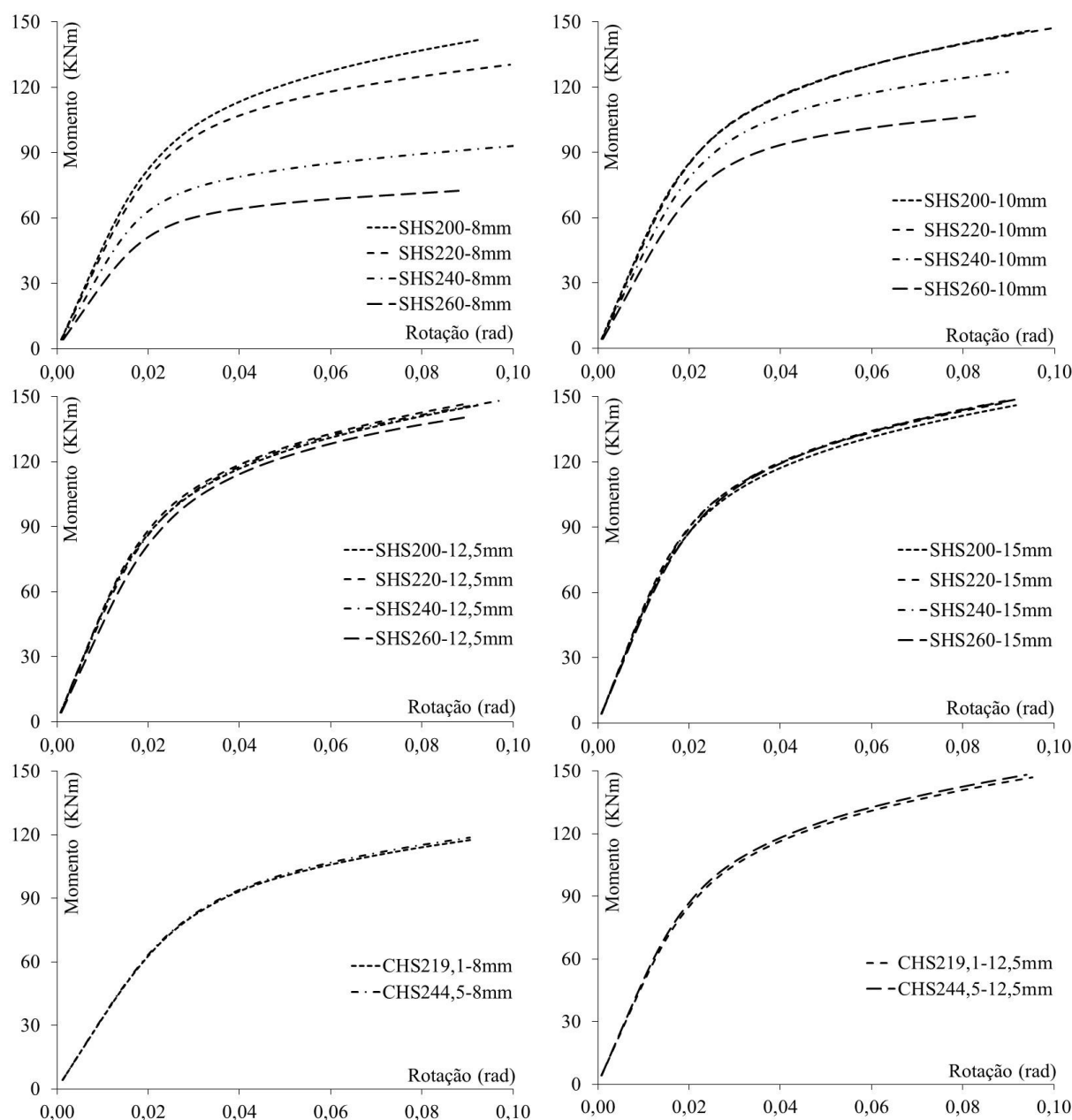
**Fig. 9:** Diagramas momento-rotação para a variação do parâmetro espessura

O comportamento da ligação na fase linear elástica (ver diagramas do lado direito da Fig. 9) pode ser definido em termos de rotação ( $Rot$ ), rigidez inicial ( $S_{j,ini}$ ) e máximo momento elástico ( $M_j$ ) [1]. Estas duas grandezas dependem das propriedades elásticas do material, do comporta-

mento elástico da ligação e da sua geometria. O comportamento na fase pós cedência é caracterizado pela rigidez ( $S_{j,pl}$ ) e rotação máxima (não avaliada no estudo). Esta rigidez depende das propriedades de endurecimento do material e da rigidez que é mobilizada nas placas carregadas.

O comportamento das ligações é alterado com a diminuição da espessura, principalmente nos modelos com a largura das colunas superior, em que a carga se exerce mais afastada dos bordos, o mesmo sucedendo com as colunas circulares, em que se verifica uma diminuição da resistência. Para espessuras superiores os resultados são idênticos aos do modelo A-13.

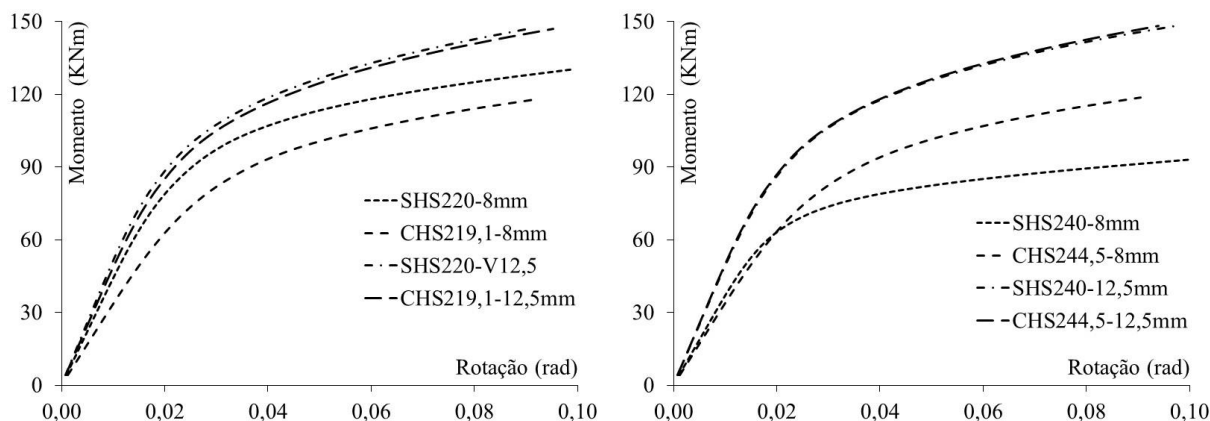
A Fig. 10 apresenta curvas momento-rotação, para a variação da largura nos modelos SHS-200, SHS-220, SHS-240, SHS-260, CHS219,1 e CHS244,5, referenciados na Tabela 1.



**Fig. 10:** Diagramas momento-rotação para a variação da largura nos perfis SHS e CHS

Verifica-se que a variação da largura dos perfis tubulares SHS é significativa no comportamento da ligação para as espessuras inferiores, não havendo grande alteração para as espessuras superiores. Por outro lado, para os diâmetros vulgares considerados no estudo, a variação do diâmetro dos perfis CHS não altera o comportamento da ligação.

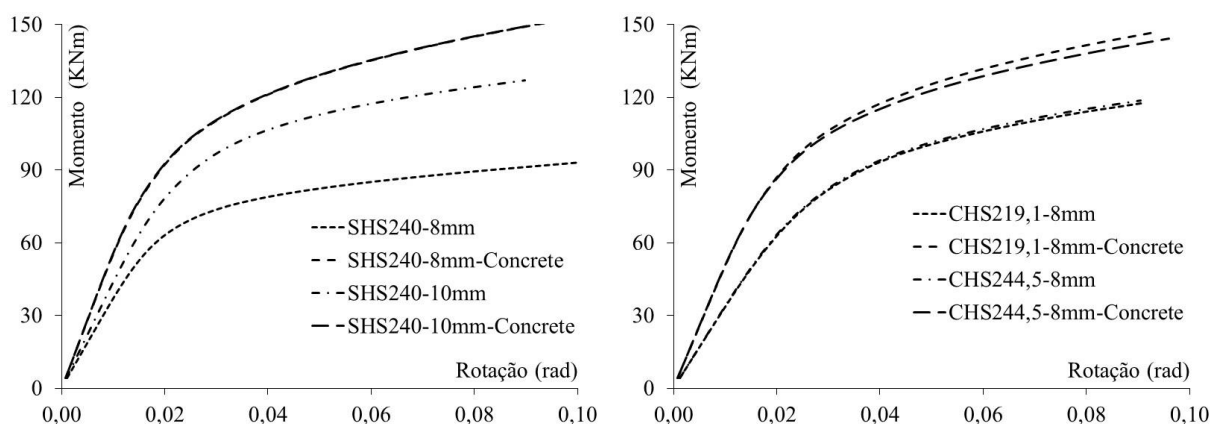
São apresentadas na Fig. 11 as curvas momento-rotação dos modelos SHS220, SHS240, CHS219,1 e CHS 244,5, referentes à comparação das secções quadradas com as circulares.



**Fig. 11:** Diagramas momento-rotação comparativos das secções retangulares e circulares

Da análise aos diagramas da Fig. 11 confirma-se que para a espessura de 8 mm e para as largura e diâmetro inferiores o perfil SHS tem mais resistência face ao CHS, isto porque os bordos do perfil estão mais próximos do contacto com os banzos do perfil em U, mas para as largura e diâmetro maiores verifica-se o inverso. Para a espessura de 12,5 mm os resultados são idênticos.

Na Fig. 12 são apresentadas as curvas momento-rotação relativas ao estudo do comportamento da ligação quando as colunas tubulares são preenchidas com betão. Nos dois casos, SHS e CHS, o enchimento com betão aumenta de forma significativa a resistência e rigidez.



**Fig. 12:** Diagramas momento-rotação comparativos da utilização de betão

Na Tabela 3 são indicados os valores obtidos para o momento elástico, rotação e rigidezes da ligação.

Os resultados dos modelos numéricos constantes na Tabela 3 indicam que dos parâmetros que mais influenciam o comportamento global da ligação são a espessura e a largura das colunas de secção quadrada. Quando a espessura diminui os valores do momento e das rigidezes decrescem. A variação da largura da coluna de secção quadrada envolve variações significativas da rigidez e do momento elástico, quando se mantem constante a espessura. Especificamente, nas colunas de secção circular, o diâmetro é um parâmetro que não provoca modificações em termos de resistência e rigidez.

Os modelos com resistência mais elevada são os de espessura superior, e os que apresentam maior rigidez, são os modelos em que se considera o enchimento do perfil com betão, sendo mais evidente nas secções SHS.

**Tabela 3:** Momento elástico, rotação e rigidezes dos modelos

<i>Mod.</i>	$M_j$ [KNm]	<i>Rot.</i> [rad]	$S_{j,ini}$ [KNm]	$S_{j,pl}$ [KNm]	<i>Mod.</i>	$M_j$ [KNm]	<i>Rot.</i> [rad]	$S_{j,ini}$ [KNm]	$S_{j,pl}$ [KNm]
<b>S-001</b>	50,0	0,0107	4651,4	397,8	<b>S-143</b>	50,8	0,0089	5679,3	414,6
<b>S-002</b>	54,2	0,0112	4851,9	411,1	<b>S-144</b>	55,0	0,0097	5687,2	415,5
<b>S-003</b>	54,2	0,0108	5027,4	421,5	<b>S-061</b>	29,8	0,0100	2969,9	129,5
<b>S-004</b>	54,2	0,0106	5134,6	435,9	<b>S-062</b>	46,9	0,0124	3767,7	217,4
<b>S-021</b>	46,2	0,0105	4392,7	273,8	<b>S-063</b>	55,4	0,0124	4482,8	351,7
<b>S-022</b>	50,4	0,0105	4811,7	372,9	<b>S-064</b>	55,4	0,0112	4963,1	432,9
<b>S-023</b>	50,4	0,0098	5136,0	420,7	<b>C-021</b>	46,2	0,0140	3291,6	334,4
<b>S-024</b>	54,6	0,0103	5297,7	403,8	<b>C-023</b>	54,6	0,0114	4800,3	409,1
<b>S-041</b>	42,3	0,0116	3640,2	180,0	<b>C-121</b>	46,2	0,0092	5038,7	415,7
<b>S-042</b>	50,8	0,0117	4329,9	288,5	<b>C-123</b>	50,4	0,0098	5148,1	419,3
<b>S-043</b>	55,0	0,0113	4859,2	381,0	<b>C-041</b>	46,6	0,0140	3330,5	327,6
<b>S-044</b>	55,0	0,0106	5188,3	413,3	<b>C-043</b>	55,1	0,0111	4949,9	418,3
<b>S-141</b>	46,5	0,0083	5596,1	412,0	<b>C-141</b>	50,8	0,0101	5052,0	386,1
<b>S-142</b>	50,8	0,0090	5627,6	413,3	<b>C-143</b>	55,1	0,0108	5108,1	377,7

## 5. Conclusões

As principais conclusões são:

1. A geometria da coluna tubular, assim como a área de transmissão da carga pelos banzos do perfil U, são parâmetros importantes no comportamento das ligações a vigas I, verificando-se alterações significativas para a variação paramétrica considerada no estudo;
2. A resistência e rigidezes da ligação são inferiores quando a espessura da secção é menor;
3. Maiores relações entre as larguras das secções SHS e da área carregada implicam resistências e rigidezes inferiores. Justifica-se pela facto de para relações baixas, as forças de tração e compressão transmitidas pelos banzos ser suportada pelas faces laterais das colunas, dando maior rigidez à ligação, enquanto na situação oposta, a resistência e a rigidez são condicionadas pela flexão da face soldada ao perfil em U;
4. A variação do diâmetro das colunas CHS não afeta o comportamento da ligação.
5. O enchimento com betão das colunas aumenta a resistência e as rigidezes da ligação.
6. Nos modelos com maior espessura, com menor largura e quando são preenchidos com betão o comportamento da coluna pode considerar-se rígido, pois os resultados são similares aos obtidos para o modelo A-13.

## Referências

- [1] CEN, Eurocode 3: Part 1.8: “Design of Joints”, EN 1993-1-8, 2010.
- [2] Jaspat J.P., Pietrapertosa C., Weynand K., Busse E., Klinkhammer R. CIDECT Report 5BP-4/05: “Development a Full Consistent Design Approach for Bolted and Welded Joints in Building Frames and Trusses between Steel Members Made of Hollow and/or Open Sections”, Application of the Component Method, V 1 - Practical Guidelines, 2005.
- [3] Element Reference Manual, LUSAS, FEA Ltd, United Kingdom.
- [4] Tension Testing of Metallic Structural Materials for Determining Stress-Strain Relations under Monotonic and Uniaxial Tensile Loading - RILEM Draft Recommendations, 1990.
- [5] CEN, Eurocode 3: Part 1.1: “General Rules and Rules for Buildings”, EN 1993-1-1, 2010.