

IX CONGRESSO DE
Construção Metálica &
e Mista

I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DE PERFIS EM U INVERTIDOS EM LIGAÇÕES DE COLUNAS TUBULARES COM VIGAS I

Luís B. Magalhães^{a,*}, Carlos S. Rebelo^b e Sandra S. Jordão^c

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

^{b,c} *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*

Resumo. Neste artigo apresenta-se um estudo paramétrico com modelos numéricos de elementos finitos de ligações entre colunas metálicas tubulares e perfis I por meio de perfis em U invertidos soldados. Para calibração dos modelos, os resultados foram comparados com os obtidos em ensaios experimentais. Com os modelos numéricos desenvolvidos, pretende-se avaliar quais os principais parâmetros que condicionam o comportamento dos elementos da ligação, em especial o das componentes da alma e dos banzos do perfil em U. Os parâmetros escolhidos para diferenciação dos modelos foram as dimensões dos elementos do perfil e as dimensões da área carregada.

1. Introdução

Quando comparados com outros perfis metálicos, os perfis tubulares apresentam um comportamento estrutural privilegiado devido à sua capacidade de suportar cargas axiais, flexão em várias direções e torção, além de vantagens consideráveis em termos de manutenção e estética, a um custo razoável. No entanto, apresentam dificuldades associadas às ligações, principalmente a vigas de perfil I. De facto, a solução soldada torna-se dispendiosa e a solução aparafusada é inviável por não haver acesso ao interior do perfil tubular. 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.

A utilização de perfis em U invertidos (channels) soldados à coluna tubular aos quais se ligam vigas I com placa de topo é uma solução que conjuga baixo custo de construção, facilidade de implementação e potencialmente bom comportamento estrutural pela ductilidade obtida através da deformação da alma do perfil em U.

O objetivo deste estudo é caracterizar o comportamento destas ligações, recorrendo a um modelo de elementos finitos (FEM) calibrado com resultados experimentais.

Os resultados do estudo paramétrico com modelos numéricos destas ligações, permitem relacionar os parâmetros considerados relativos ao perfil em U com o comportamento estrutural da ligação, nomeadamente na resistência, na rigidez e na capacidade de rotação.

2. Estudo paramétrico

Os modelos de elementos finitos caracterizam numericamente os protótipos dos ensaios experimentais, representados no esquema da Fig. 1, sendo constituídos por duas placas de banzo soldadas à placa da alma com 4 furos para modelar a sua ligação aparafusada à placa de extremidade da viga em I na qual é aplicada a carga.

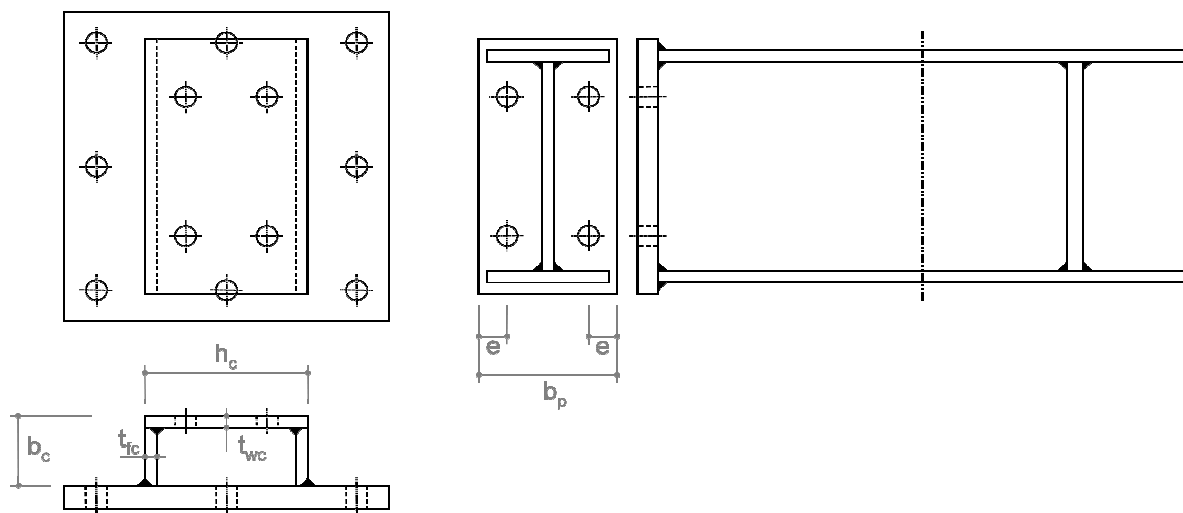


Fig. 1: Esquema do perfil em U e da viga de aplicação do carregamento

O comportamento do perfil em U invertido soldado é condicionado pelas componentes da sua alma e banzos:

- Placa da alma em flexão;
- Placas de banzos em corte;
- Placas de banzos em compressão;
- Placas de banzos em tração.

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

- Espessura e largura das placas da alma e dos banzos;
- Distância entre parafusos na mesma fiada;
- Geometria da placa de extremidade da viga.

As dimensões dos modelos numéricos do perfil em U e da placa de extremidade da viga, indicadas na Fig. 1, estão apresentadas na Tabela 1.

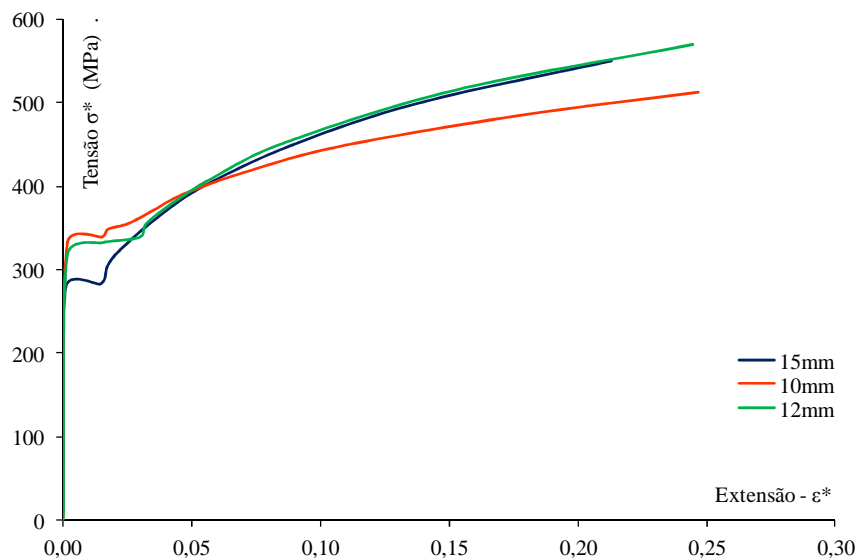
Tabela 1: Dimensões dos modelos numéricos

P	p_2 (mm)	b_c (mm)	h_c (mm)	t_{wc} (mm)	t_{fc} (mm)	Modelo	Placa de extremidade	
							b_p (mm)	e (mm)
1	85	90	200	12	15	A-11	155	35
2						A-12		
3						A-13		
4						A-14		
5	100	75	200	15	10	A-15	175	45
6	70					A-16		
7	100					A-17		
8	100	105	200	15	15	A-18	175	35
9						A-19		

2.1 Características dos aços

Na modelação de elementos finitos foram considerados aços com diferentes características de comportamento elásto-plástico, de forma a calibrar o modelo numérico com os resultados experimentais.

As características dos aços usados na modelação do channel foram obtidas de ensaios uniaxiais de tração com provetes retirados de amostras das chapas usadas nos ensaios experimentais, para as três espessuras (10, 12 e 15mm). As curvas tensão-extensão obtidas destes ensaios tiveram de ser corrigidas para se considerar a secção reduzida dos provetes pela estrição [3], obtendo-se os diagramas utilizados nas modelações da Fig. 2.

**Fig. 2:** Diagramas tensão-extensão dos aços

Tendo em conta que o objetivo é analisar o comportamento do perfil em U, todos os outros elementos do modelo têm rigidez suficiente para se considerarem indeformáveis. A viga num perfil IPE300, com grande rigidez à flexão [4] quando comparada com a do perfil, e a placa de topo, com 25mm de espessura, tem as características dum aço S355. Os parafusos M24 são da classe 10.9.

3. Modelação de elementos finitos

3.1 Modelos

As modelações de elementos finitos foram efetuadas com o programa de elementos finitos LUSAS. Os modelos numéricos representam os protótipos usados nos ensaios experimentais (ver Fig. 3), constituídos pelo perfil em U, a viga de aplicação do carregamento com a placa de extremidade e os quatro parafusos. A Fig. 4 apresenta alguns pormenores da modelação de um dos modelos numéricos do estudo paramétrico. A malha de elementos finitos tem uma discretização mais apertada no perfil, na placa de extremidade e na zona da viga mais próxima da ligação, sendo que nas zonas mais afastadas se permite ter uma malha mais aberta.



Fig. 3: Protótipo dos ensaios experimentais

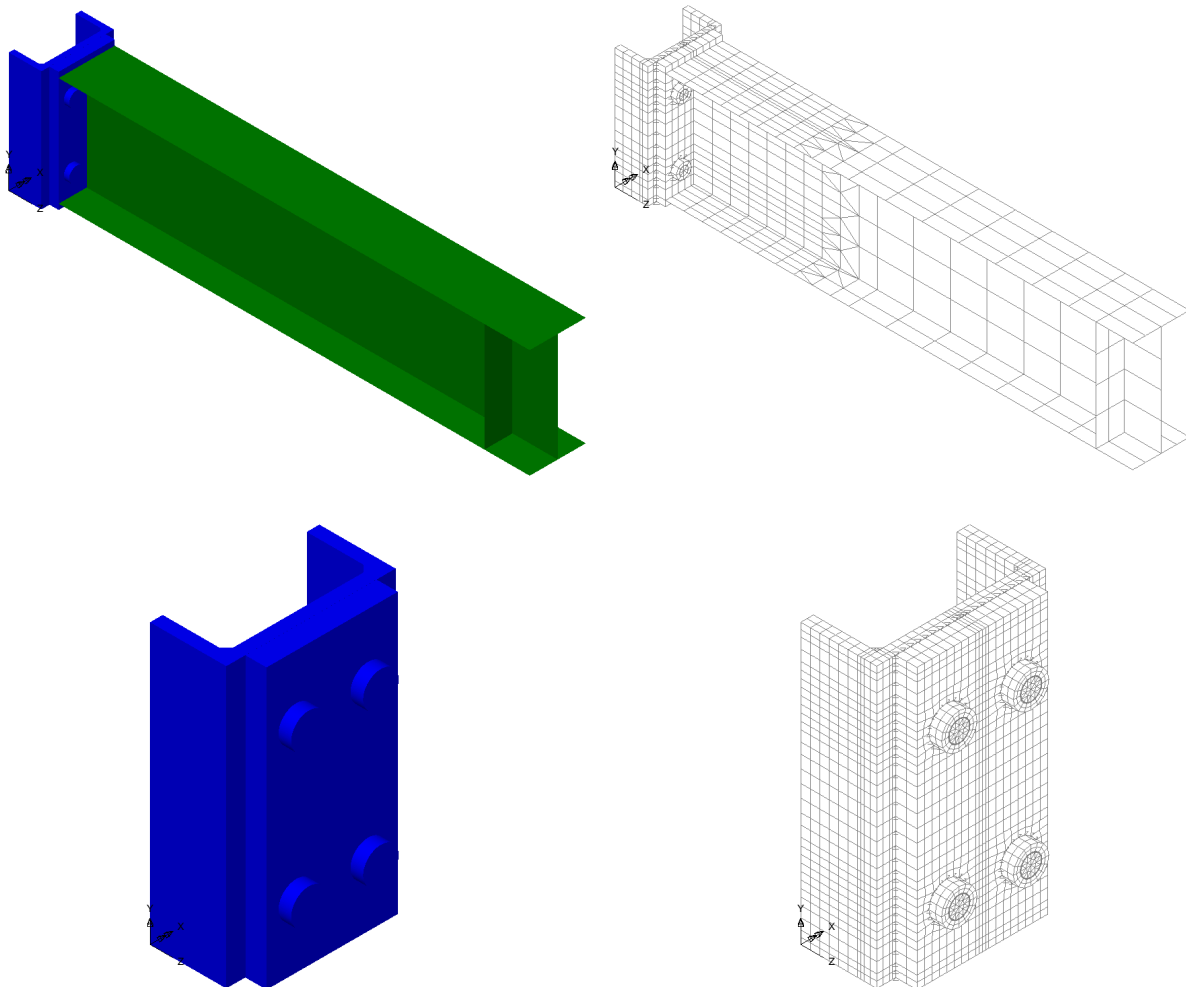


Fig. 4: Pormenores dos modelos numéricos

3.2 Elementos finitos

Para os elementos 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. 5 esquematiza a formulação dos elementos finitos utilizados [5].

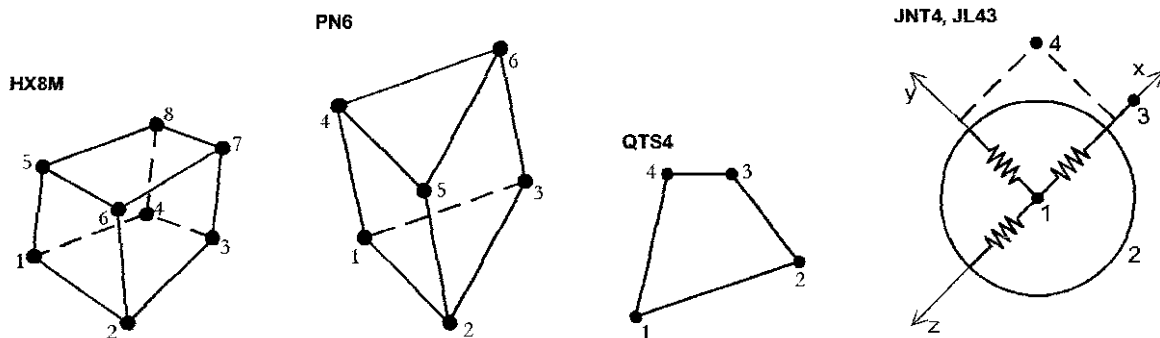


Fig. 5: Elementos finitos usados nas modelações

3.3 Convergência da malha

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 2x2x2, 3x3x3 e 4x4x4, ver Fig. 6, com base num dos 8 modelos de malha inicial não dividida, que se denominou de 1x1x1.

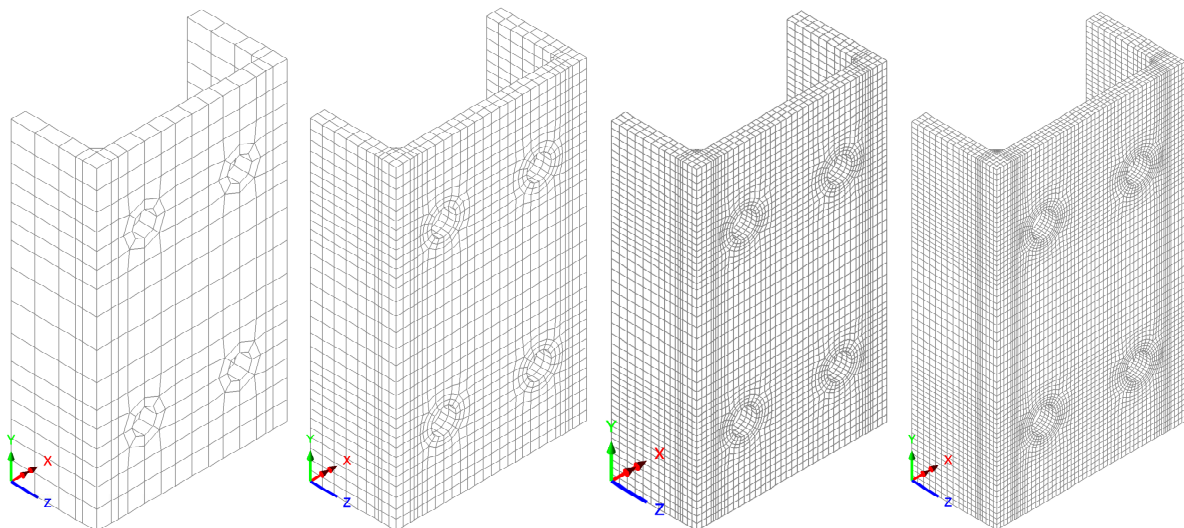


Fig. 6: Malhas de elementos finitos usadas na convergência 1x1x1, 2x2x2, 3x3x3 e 4x4x4

Para comparar os quatro modelos foram determinados os diagramas força-deslocamento, apresentados na Fig. 7. Força no nó de aplicação da força na viga (banzo superior) e deslocamento no nó oposto da viga ao de aplicação da força (banzo inferior).

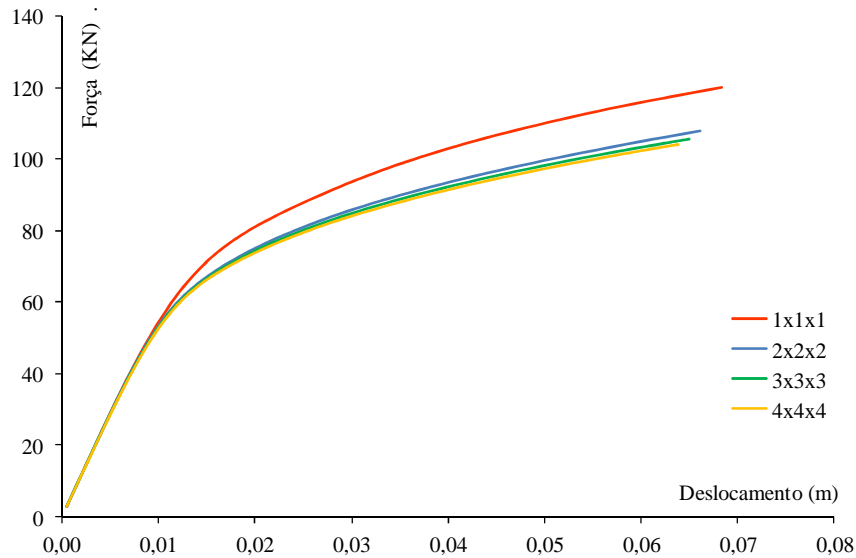


Fig. 7: Comparação dos resultados para as diferentes malhas

Da análise da Fig. 7, verifica-se que os resultados concorrem na fase de comportamento elástico do modelo, e que relativamente à fase pós cedência a partir da malha 2x2x2 os resultados são praticamente coincidentes. Devido à convergência da malha se verificar a partir da malha de 2x2x2 foi usada esta malha nos modelos utilizados no estudo paramétrico.

4. Resultados

Os ensaios dos modelos foram realizados considerando uma análise não-linear com incremento automático da carga. Apresentam-se na Fig. 8 alguns resultados em termos de deformação e de tensões de Von Mises no perfil em U.

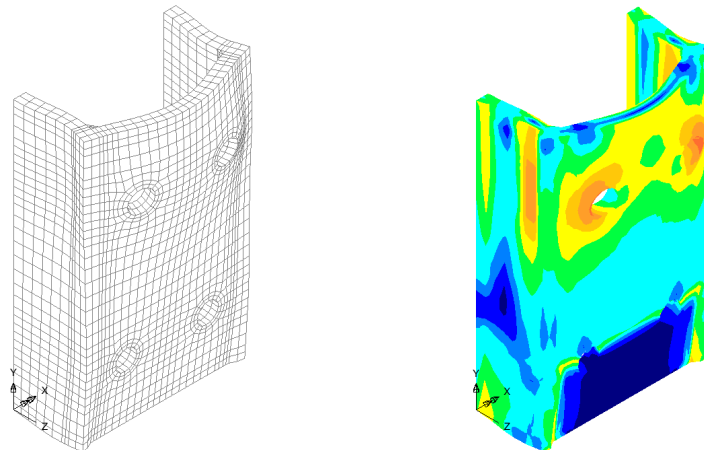


Fig. 8: Deformada e tensões de Von Mises para o último incremento de carga

A deformação dos perfis é causada pela tração dos parafusos na zona da fiada superior e pela compressão da placa de extremidade da viga na zona inferior da alma do perfil. Em ambos os casos podem observar-se deformações plásticas significativas. Relativamente às tensões é notório que são máximas nas zonas periféricas aos furos dos parafusos tracionados, na zona de compressão da placa de extremidade e nas zonas de ligação da alma com os banzos.

Os resultados do estudo paramétrico são apresentados na Fig. 9 em termos de curvas momento-rotação.

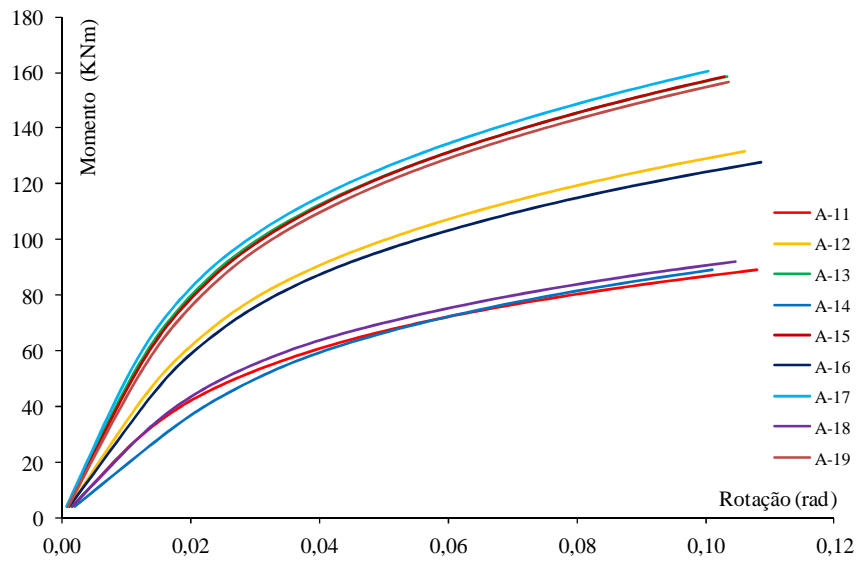


Fig. 9: Diagramas momento-rotação

As curvas momento-rotação têm duas regiões diferentes: A região inicial correspondente ao comportamento linear (representada em pormenor na Fig. 10) e a região pós cedência.

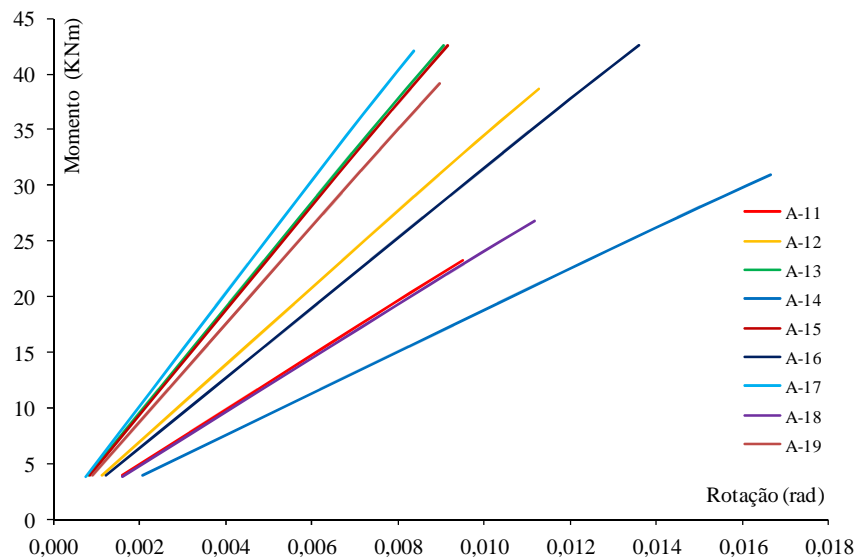


Fig. 10: Diagramas do comportamento linear dos modelos

O comportamento da ligação na fase elástica pode ser definido em termos de rotação e rigidez inicial ($S_{j,ini}$) e máximo momento elástico (M_j) [1]. Estas duas grandezas dependem das propriedades elásticas do material, do comportamento 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 neste estudo). A rigidez pós cedência depende das propriedades de endurecimento do material e da rigidez que é mobilizada nas placas carregadas.

Na Tabela 2 são indicados os resultados obtidos para os dois modelos base do estudo paramé-

trico, nomeadamente os modelos A-12 e A-15.

Tabela 2: Momento elástico e rigidezes dos modelos A-12 e A-15

Protótipo	Momento Elástico M_j [KNm]	Rotação Elástica [rad]	Rigidez Inicial $S_{j,ini}$ [KNm]	Rig. Pós Cedência $S_{j,pl}$ [KNm]
A-12	38,7	0,01125	3440,0	226,4
A-15	42,6	0,00916	4650,7	369,6

Os restantes resultados são apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4, na forma de relação com os resultados dos dois modelos base A-12 e A-15 respetivamente.

Tabela 3: Resultados comparativos relativamente ao modelo A-12

Protótipo	Momento Elástico M_j	Rotação Elástica	Rigidez Inicial $S_{j,ini}$	Rig. Pós Cedência $S_{j,pl}$
A-12	1	1	1	1
A-11	0,80	0,97	0,83	0,77
A-13	1,10	0,81	1,37	1,58
A-14	0,80	1,48	0,54	0,57

Tabela 4: Resultados comparativos relativamente ao modelo A-15

Protótipo	Momento Elástico M_j	Rotação Elástica	Rigidez Inicial $S_{j,ini}$	Rig. Pós Cedência $S_{j,pl}$
A-15	1	1	1	1
A-16	1,00	1,48	0,67	0,54
A-17	0,99	0,91	1,08	1,03
A-19	0,92	0,98	0,94	0,90
A-17	1	1	1	1
A-18	0,73	1,18	0,61	0,48

Os resultados dos modelos numéricos indicam que dos parâmetros que mais influenciam o comportamento global da ligação são a espessura e a largura da placa da alma. Quando a espessura da placa (t_{wc}) diminui os valores do momento e das rigidezes decrescem (Comparar os resultados dos modelos A-12 e A-11). A variação da largura da placa da alma (h_c) envolve variações significativas da rigidez e do momento elástico, quando se mantém constante a largura da placa de extremidade da viga. O aumento (Comparar os resultados do modelo A-12 com o A14) implica uma diminuição destas grandezas, porque a variação deste parâmetro altera a rigidez de flexão da alma. Contrariamente (Modelo A-13), verificam-se aumentos do momento e das rigidezes.

A área carregada, com influência na zona de tração pela distância entre os parafusos (p_2) e na zona de compressão através da largura da placa de extremidade da viga (b_p), é também um parâmetro importante na rigidez da ligação. A ligação é mais resistente e rígida quando a carga na zona de compressão é aplicada até maior proximidade dos banzos, ou seja, quando a placa de extremidade (b_p) é mais larga, aproximando-se da largura da placa da alma (h_c). A

comparação dos modelos A-12 e A-13, assim como A-12 com A-15, evidenciam esta tendência. Comparando os resultados dos modelos A-15 e A-16, entre os quais houve variação do afastamento entre parafusos (p_2), verifica-se que as rigidezes diminuem.

A largura dos banzos (b_c) é um parâmetro cuja variação não evidencia alterações notórias do comportamento da ligação, porque as variações efetuadas com este parâmetro são insuficientes para alterar de forma significativa a esbelteza dos banzos. No entanto, verifica-se que a diminuição deste parâmetro aumenta as rigidezes (Comparar os resultados dos modelos A-15 e A-17), e o aumento diminui a resistência a as rigidezes (A-15 com A-19).

A influência da variação da espessura dos banzos (t_{fc}) é evidente quando comparamos os resultados dos modelos A-17 e A-18. A diminuição deste parâmetro altera significativamente o comportamento da ligação, visto diminuir a resistência dos banzos à compressão e à tração. Na Tabela 5 é apresentada em síntese a influência da variação dos parâmetros do perfil.

Tabela 5: Síntese do estudo paramétrico

Parâmetro	Variação	Protótipos	M_j	$S_{j,ini}$	$S_{j,pl}$
Espessura alma [t_{wc}]	Diminuição	A-12 → A-11	<	<	<
Largura alma [h_c]	Diminuição	A-12 → A-13	>	>>	>>
	Aumento	A-12 → A-14	<	<<	<<
Largura placa de extremidade [b_p]	Aumento	A-12 → A-15	>	>>	>>
Distância entre parafusos [p_2]	Diminuição	A-15 → A-16	=	<<	<<
Largura banzos [b_c]	Diminuição	A-15 → A-17	=	>	=
	Aumento	A-15 → A-19	<	<	<
Espessura banzos [t_{fc}]	Diminuição	A-17 → A-18	<<	<<	<<

5. Conclusões

As principais conclusões são:

1. A geometria da alma e dos banzos do perfil em U invertido, assim como a área carregada, são parâmetros de importante influência no comportamento estrutural das ligações de vigas I com colunas tubulares com os perfis em U, tendo-se verificado alterações significativas do comportamento estrutural para a variação paramétrica considerada no estudo;
2. A resistência da ligação é inferior quando a espessura da alma do perfil é menor, o mesmo se passando relativamente às rigidezes, mas de forma menos significativa;
3. Maiores relações entre as larguras da alma do perfil e da placa de extremidade da viga implicam resistências e rigidezes inferiores. Justifica-se pela facto de para relações baixas, a força de compressão transmitida pela placa de extremidade é suportada pelos banzos do perfil em compressão, dando maior resistência e rigidez à ligação, enquanto que na situação oposta a resistência e a rigidez são condicionadas pela alma do perfil em flexão;
4. A distância entre os parafusos da fiada tracionada é um parâmetro influente, porque a distribuição da carga através da largura do perfil influencia o caminho de transferência de carga da alma para os banzos do perfil, influenciando assim a deformação plástica da alma;

5. A largura dos banzos, embora as variações efetuadas não sejam expressivas para provocar grandes alterações, é um parâmetro que influencia a ligação tendo em atenção a variação da esbelteza dos banzos do perfil;
6. A espessura dos banzos é também um parâmetro importante, a sua diminuição implica perda de resistência e rigidez, visto que suportam compressão, tração e corte.

Referências

- [1] CEN, Eurocode 3: “Design of Steel Structures”, 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, Volume 1 - Practical Guidelines, 2005.
- [3] Tension Testing of Metallic Structural Materials for Determining Stress-Strain Relations under Monotonic and Uniaxial Tensile Loading - RILEM Draft Recommendations, 1990, 23 35-46
- [4] CEN, Eurocode 3: “Design of Steel Structures”, Part 1.1: “General Rules and Rules for Buildings”, EN 1993-1-1, 2010.
- [5] Element Reference Manual, LUSAS, FEA Ltd, United Kingdom.