



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE COLUNAS TUBULARES EM LIGAÇÕES A VIGAS I COM PERFIS EM U INVERTIDOS

Magalhães L^a, Rebelo C^b e Jordão S^c

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

^{b,c} *ISISE - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra*

Resumo. O artigo apresenta resultados de ensaios experimentais efetuados com ligações metálicas viga - coluna tubular, aparafusadas com recurso a perfis em U invertidos. Os parâmetros variáveis considerados nos ensaios dizem respeito às características dos perfis tubulares, nomeadamente a largura, a espessura das paredes, o enchimento com betão e o esforço axial. O layout dos ensaios é constituído por um pórtico metálico que suporta os protótipos e o atuador de carga que transmite a força à viga, submetendo a ligação a momento fletor e esforço transversal. Os resultados são apresentados na forma de curvas momento-rotação e força-deslocamento, concluindo-se que os parâmetros considerados são influentes no comportamento global da ligação.

1. Introdução

As colunas tubulares apresentam um comportamento estrutural privilegiado, quando comparadas com outros perfis metálicos, 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 ligação de perfis tubulares a vigas em I, através de perfis em U invertidos de secção soldada, apresenta-se como uma boa solução, permitindo a utilização de parafusos. Além disso, este tipo de ligação tem um razoável custo de construção, é fácil de implementar e possui grande ductilidade através da deformação combinada do painel da alma do perfil e da coluna tubular. As soluções tradicionais, ligação diretamente aparafusada ou ligação soldada, ou são impraticáveis devido à necessidade de acesso ao interior do perfil tubular, ou tornam-se dispendiosas devido ao processo de soldadura ser executado em obra.

Devido a estes fatos, as correntes de investigação não se têm dirigido para estas tipologias de ligação, resultando em deficiências ao nível de códigos regulamentares e de métodos de análise para o seu dimensionamento.

O Eurocódigo 3 [1] fornece algumas regras para ligações soldadas entre perfis tubulares, incluindo também o cálculo da resistência para ligações com placa soldadas transversalmente, mas não para ligações aparafusadas. Contudo, devido à sua importância, este tema tem tido nos últimos anos várias contribuições significativas. De destacar a pesquisa que o “Comité International pour le Développement et l’Étude de la Construction Tubulaire” CIDECT, tem vindo a realizar, visando o desenvolvimento de uma abordagem de dimensionamento unificado de ligações metálicas, alargando o campo de aplicação do método das componentes do Eurocódigo 3 [2].

O principal objetivo desta investigação é a caracterização do comportamento não linear de ligações metálicas com o perfil em U invertido, soldado à coluna de seção tubular e aparafusado a viga de perfil em I, conforme mostram os esquemas da Fig. 1.

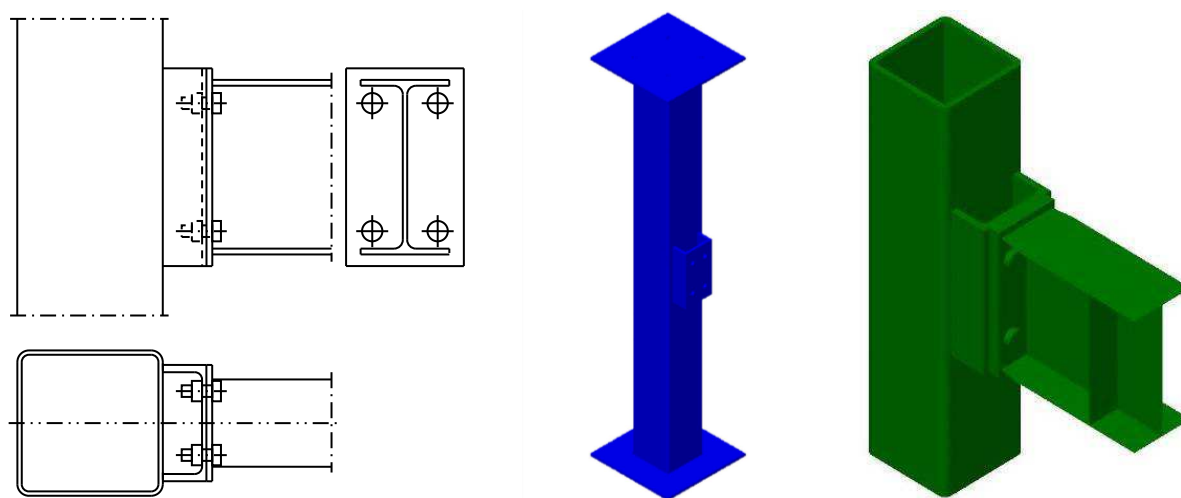


Fig. 1: Esquemas da ligação viga coluna SHS

2. Programa de ensaios experimentais

2.1 Valores paramétricos

As várias configurações das dimensões das colunas selecionadas para os protótipos tubulares dos ensaios experimentais correspondem à variação paramétrica dos fatores mais influentes no seu comportamento estrutural:

- Espessura;
- Largura;
- Preenchimento ou não com betão;
- Esforço axial.

Em todos os ensaios experimentais, o perfil em U, a viga e a placa de topo mantêm sempre as mesmas características e dimensões, indicadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões dos elementos da ligação com parâmetros fixos

N	p ₂ [mm]	b _c [mm]	h _c [mm]	t _{wc} [mm]	t _{fc} [mm]	Protótipo (Referência)	Chapa de topo	
							b _p [mm]	e [mm]
3	85	90	185	15	15	A-13	155	35

O protótipo com estas características e dimensões, no entanto sem incluir a coluna tubular, já foi testado experimentalmente, em ensaios denominados “ensaio de componentes” considerando que as colunas tubulares são rígidas e não deformáveis, sendo designado por A-13.

As dimensões e as características dos perfis tubulares dos ensaios experimentais, constituindo os parâmetros variáveis do estudo, são indicadas na Tabela 2.

N.º	Perfil	w _c [mm]	t _c [mm]	Betão	Esforço Axial	Protótipo (Referência)
1	SHS	220	8	Não	Não	S-021
2		250				10
3			S-052			
4		220	8	Sim	S-121	
5		250		Não	Sim	S-251

2.2 Características dos protótipos

Os protótipos são formados pela coluna com duas placas soldadas na parte superior e na parte inferior, para fazer a ligação com parafusos ao layout de testes. A viga corresponde a um perfil IPE300 com chapa de topo, da classe de resistência S355, ambas com alta resistência à flexão [3] quando comparadas com a da coluna e do perfil em U. O perfil em U, em aço da classe S275, é constituído por duas chapas de banzo soldadas a uma placa de alma com quatro furos para permitir aparafusar à chapa de topo da viga. Os parafusos e porcas, tamanhos M24, são da classe de resistência 10.9. A Fig. 2 mostra alguns pormenores dos protótipos usados nos ensaios.



Fig. 2: Aspetos dos protótipos

2.3 Layout dos ensaios

O layout de ensaios corresponde a uma estrutura em pórtico constituída por perfis HEB e IPE reforçados, ancorada por dywidags na laje de reação em betão e contraventada relativamente aos deslocamentos horizontais numa parede de reação, também em betão. A Fig. 3 apresenta um esquema (*) e uma foto com a perspetiva geral do layout.

A viga, ligada à parede de reação, suporta o atuador e o cabeçote que faz a ligação com parafusos aos protótipos de ensaio na parte superior do layout. Inferiormente, os protótipos são também aparafusados a outro cabeçote que está ligado a uma sapata de betão. Para garantir as

condições de apoio rotuladas nos extremos da coluna, ambos os cabeçotes têm um mecanismo que permite a rotação no eixo perpendicular ao plano da ligação.

Para impedir os deslocamentos laterais da viga, o layout incorpora um sistema de mobilização que apenas permite o deslocamento vertical por intermédio de rolamentos. Para aplicar o esforço axial nas colunas foram utilizados macacos hidráulicos que tracionam quatro dywidags ancorados nos cabeçotes. Na Fig. 4 podemos ver alguns detalhes do layout.

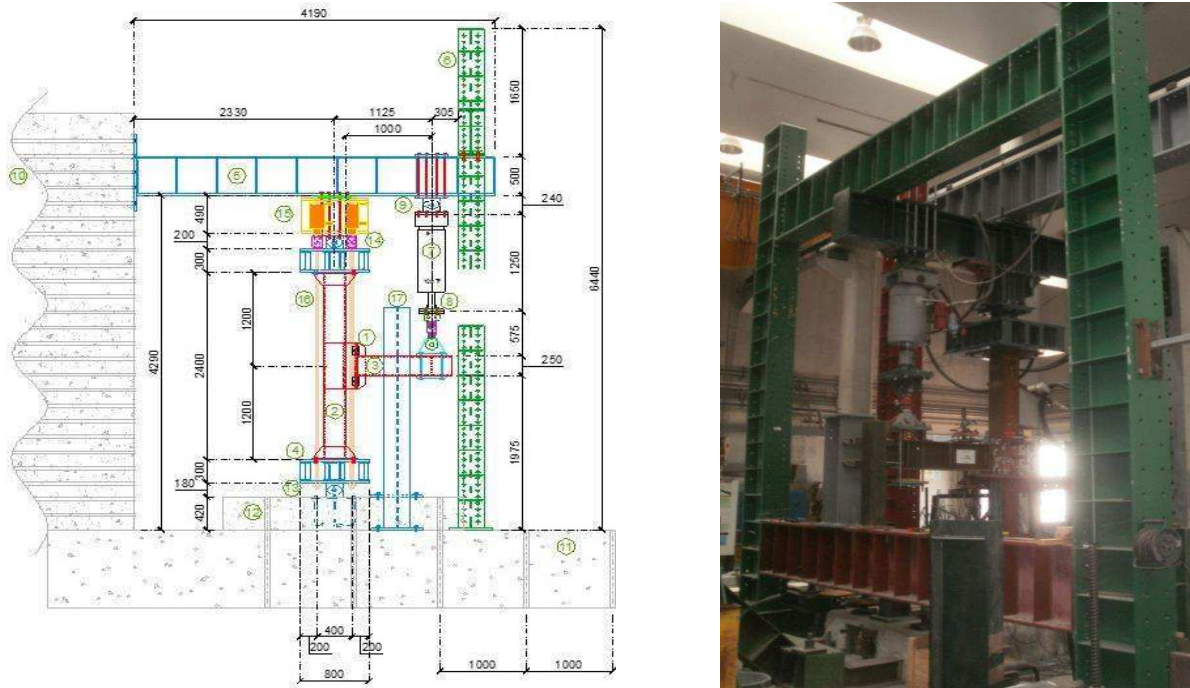


Fig. 3: Esquema e perspectiva geral do layout



Fig. 4: Detalhes do layout

2.4 Solicitações e dispositivos de medição

Foram utilizados extensómetros para avaliar o estado de tensão em pontos significativos de toda a ligação, na coluna e no perfil em U, e também para determinar a tensão de tração nos parafusos, conforme ilustrado na Fig. 5a.

Transdutores de deslocamentos foram usados para avaliar a rotação de todos os componentes da ligação e para medir os deslocamentos em pontos-chave de toda a estrutura, estrategicamente colocados de acordo com o esquema da Fig. 5b.

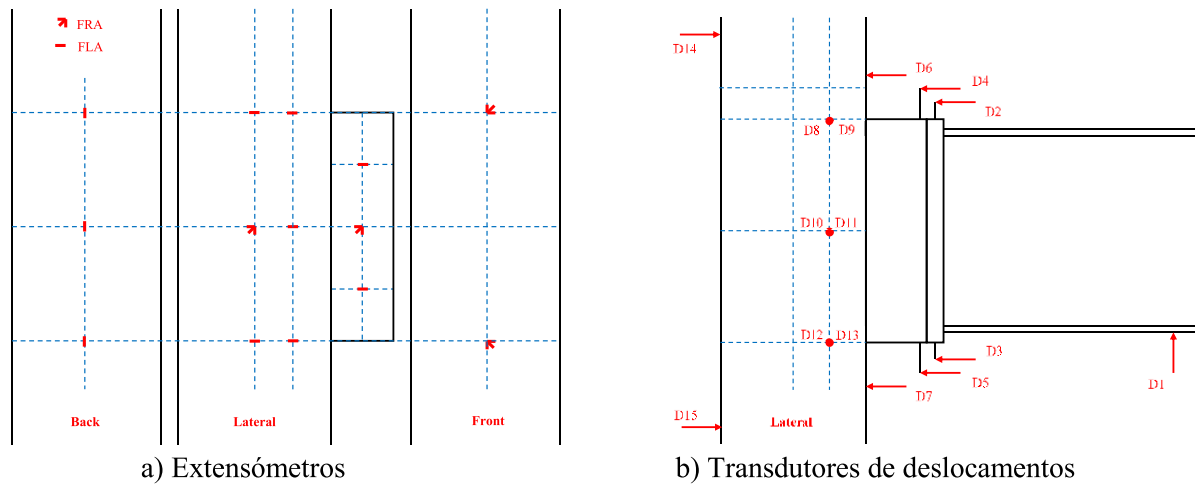


Fig. 5: Planos dos dispositivos de medição, dos extensómetros e dos transdutores de deslocamentos

Os testes foram realizados com um atuador de 100 tf, que transmite a carga à viga na extremidade por meio de um dispositivo articulado, de modo que a carga aplicada permaneça ortogonal à viga no decorrer do ensaio. A carga é medida por meio de duas células de carga, uma colocada entre o atuador e a viga, e a outra colocada por baixo do banzo inferior. Sobre o cabeçote superior, para controlar a carga axial aplicada às colunas, foram usadas quatro células de carga. O esforço axial aplicado ao protótipo S-251 no ensaio foi de aproximadamente 400 KN.

3. Análise dos resultados dos ensaios

Este artigo apresenta os resultados dos ensaios monotónicos realizados com os protótipos de características indicadas na Tabela 2. A Fig. 6 ilustra o layout no início e no final dos ensaios.

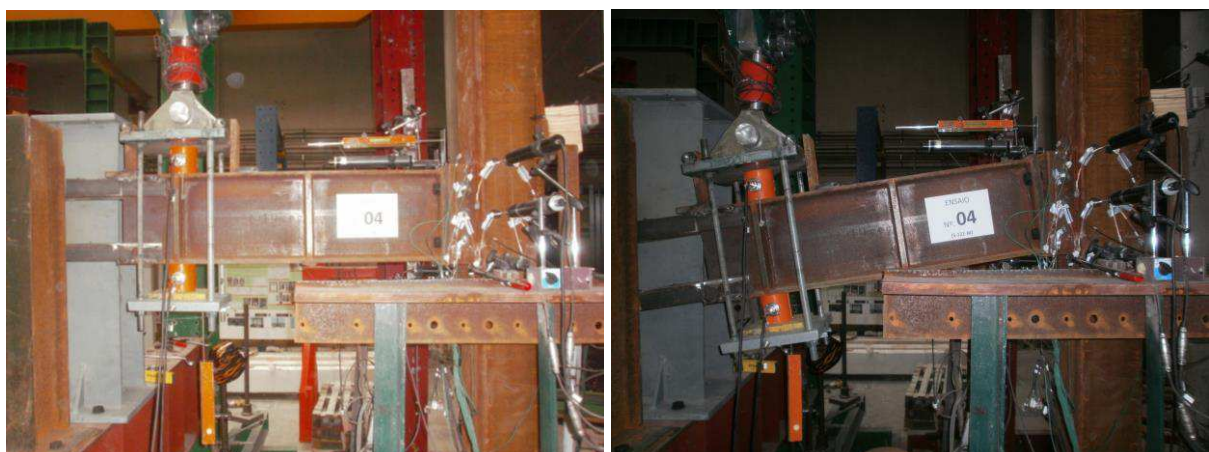


Fig. 6: Layout no início e final dos ensaios

3.1 Deformações e modos de rotura

As deformações do perfil em U são causadas pela tração dos parafusos na parte superior e pela compressão da chapa de topo da viga na parte inferior.

O objetivo desta parte da investigação é avaliar e comparar as deformações das colunas na zona da ligação, sendo evidentes as significativas deformações plásticas na face da corda e na parede lateral da corda, imputadas pela compressão e tração exercida pelos banzos do perfil em U.

A deformação dos protótipos é condicionada pela rigidez da coluna e do perfil em U. Quando a espessura das paredes da coluna é superior, ou quando é preenchida com betão, caso dos protótipos S-052 e S-121, as deformações são maiores no perfil em U. Nas situações opostas, casos dos protótipos S-021, S-051 e S-251, as faces da coluna são aquelas que superiores deformações plásticas evidenciam. Na Fig. 7 são visíveis as deformações plásticas nos elementos.



Fig. 7: Deformações plásticas nos elementos

Pelas mesmas razões, influenciados pela rigidez dos elementos, os modos de rutura verificados são distintos. Quando não preenchida com betão, a rutura ocorreu no cordão de soldadura entre os banzos e a coluna, havendo situações de rasgamento da face da coluna. No protótipo preenchido com betão (S-121), a rutura ocorreu num dos cordões de soldadura da alma com os banzos do perfil em U, como se observa na Fig. 8.



Fig. 8: Modos de rutura

3.2 Curvas momento-rotação

Os resultados dos testes monotónicos podem ser expressos em termos de curvas momento-rotação.

As curvas momento-rotação têm duas regiões diferentes: A região inicial correspondente ao comportamento linear e a região pós cedência. O comportamento da ligação na fase elástica pode ser definido em termos de rigidez de rotação inicial ($S_{j,ini}$) e máximo momento elástico ($M_{j,el}$) [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 sua rigidez ($S_{j,pl}$) e capacidade de rotação (não avaliada no presente estudo). A rigidez pós cedência depende das propriedades de endurecimento do material e da rigidez que é mobilizada nas chapas carregadas.

A Fig. 9 mostra as curvas obtidas com os deslocamentos medidos no transdutor de deslocamentos D1, identificado na Fig. 5, em que se determinou a rotação total da ligação, medida relativamente ao eixo da coluna. No gráfico da esquerda apenas se representa a parte do comportamento linear elástico, no qual é simples identificar as ligações que apresentam rigidez inicial superior ou inferior. O protótipo S-121, no qual a coluna é preenchida com betão, é o que apresenta maior rigidez, enquanto que o protótipo S-051, com a coluna de paredes de maior largura e menor espessura, apresenta menor rigidez. Na Tabela 3 são indicados os valores obtidos para a resistência e rigidezes das ligações. A rigidez pós elástica da Tabela 3 não foi calculada com rigor, considerando o momento plástico e a capacidade de rotação, sendo que, os valores apresentados apenas servem para estimar e comparar a rigidez entre os protótipos.

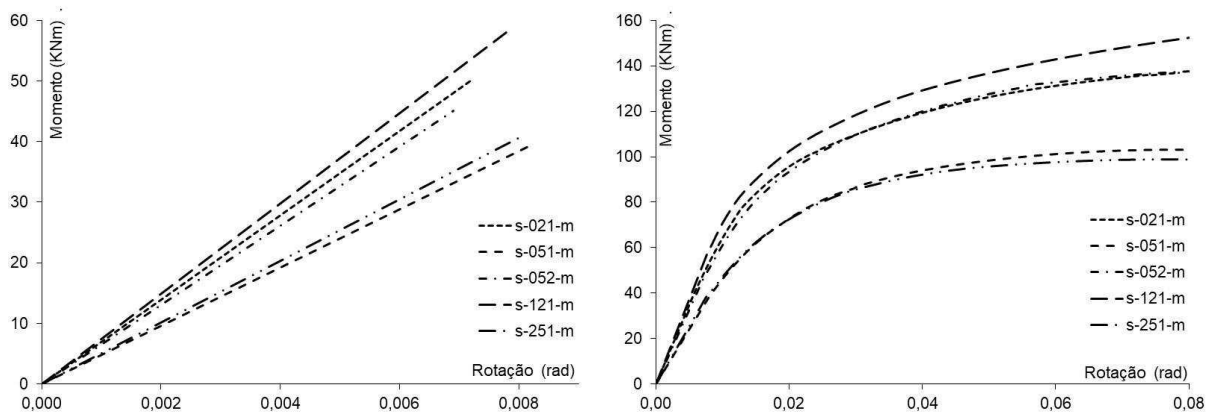


Fig. 9: Curvas momento-rotação da ligação

Tabela 3: Momento elástico, rotação e rigidezes dos modelos

Protótipo (Referência)	$M_{j,el}$ [KNm]	Rot. [rad]	$S_{j,ini}$ [KNm]	$S_{j,pl}$ [KNm]
S-021	50,2	0,0072	6967,8	258,3
S-051	39,5	0,0082	4812,2	74,4
S-052	45,1	0,0069	6531,1	208,3
S-121	58,2	0,0078	7457,5	453,9
S-251	40,7	0,0080	5011,7	58,7

A Fig. 10 representa as rotações verificadas na chapa de topo da viga, avaliada com a diferença dos valores medidos com os transdutores de deslocamentos D2 e D3 (Fig. 10a), e as rotações verificadas imediatamente depois da chapa de alma do perfil em U, avaliada com a diferença dos valores medidos com os transdutores D4 e D5 (Fig. 10b).

Na Fig. 11 são apresentadas as curvas momento-rotação obtidas nas diferentes zonas da ligação, individualmente para cada protótipo (S-051 e S-121), de forma a comparar o contributo de cada parte da ligação na sua rigidez.

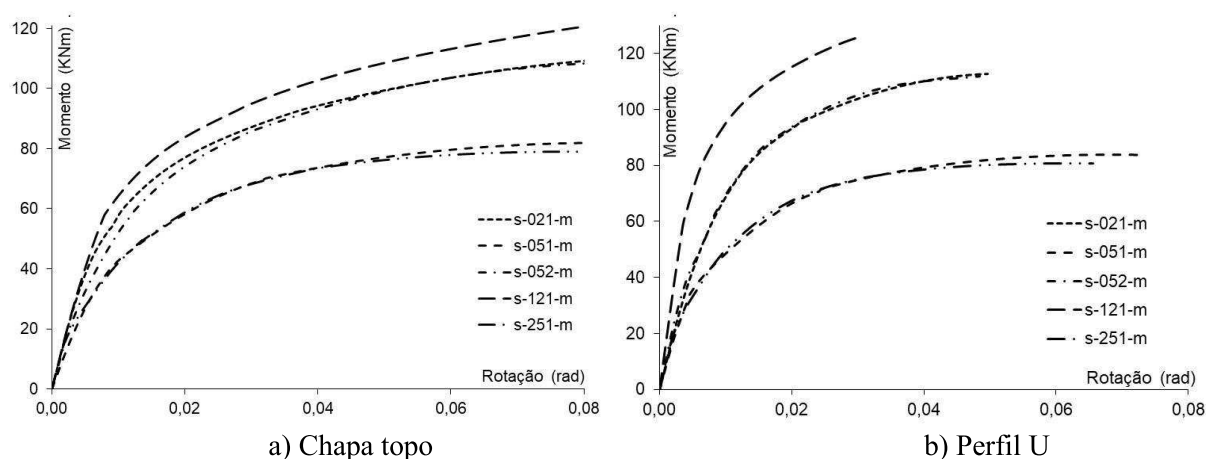


Fig. 10: Curvas momento-rotação na chapa de topo e na alma do perfil em U

Da análise aos resultados obtidos com a diferença de valores medidos com os transdutores D14 e D15 (ver Fig. 5), com os quais se pode avaliar a rotação da coluna relativamente ao seu eixo longitudinal, verifica-se que estas rotações são insignificantes quando relacionadas com as rotações totais (relações na ordem dos 1,5%), por esta razão, não são contempladas nos gráficos das Fig. 10 e Fig. 11.

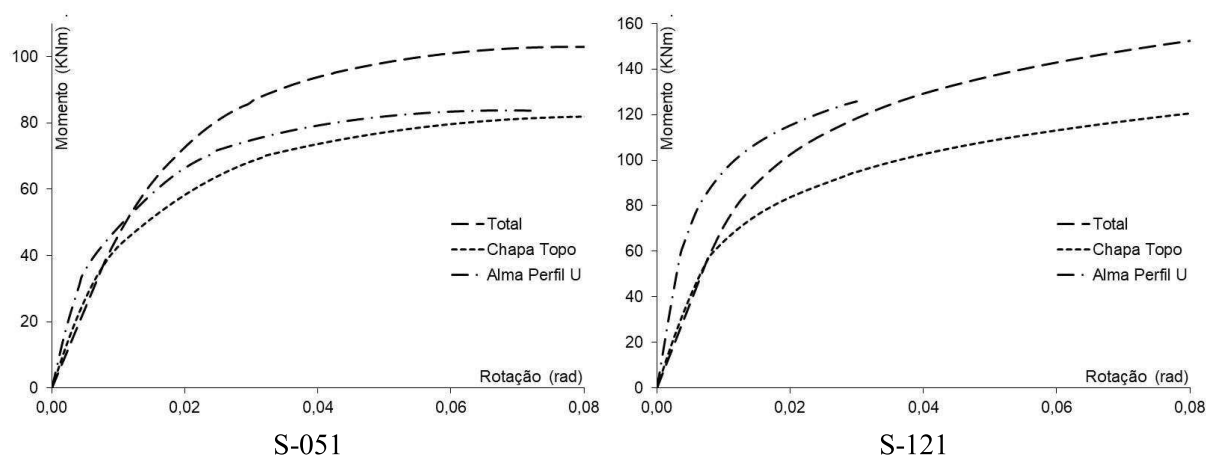


Fig. 11: Curvas momento-rotação em zonas diferentes da ligação, nos protótipos S-051 e S-121

Em análise dos resultados, fica demonstrado que a deformação da chapa de topo da viga é quase nula, não contribuindo para a variação da rigidez da ligação, porque a rotação medida é idêntica à rotação total, apenas difere o valor do momento porque este é determinado considerando que o braço é mais curto.

A deformação da alma do perfil em U é determinante na rotação da ligação nos casos em que há maior rigidez na coluna e os banzos do perfil em U exercem tração e compressão mais alinhados com as paredes laterais da coluna, conferindo a esta zona da ligação mais resistência e rigidez. Na situação contrária, espessura inferior e largura superior da coluna, as deformações na face da corda e nas paredes laterais da corda são superiores, contribuindo em grande parte para a rotação da ligação. Estas duas situações podem ser identificadas nas curvas da Fig. 11, analisando as rotações na “Alma Perfil U”, que mostram que a rotação é menor no protótipo S-121 depois da medição na alma do perfil em U, e maior no protótipo S-051 depois desta medição.

3.3 Curvas força-deslocamento

Conforme se observa na Fig. 7, as colunas tubulares na zona da ligação sofrem deformações, mais ou menos visíveis consoante menor ou maior rigidez, verificando-se um estreitamento da largura da coluna na zona superior entre as paredes laterais e um alargamento na zona inferior, estando este alargamento associado à rotura da parede lateral da corda.

A Fig. 12 apresenta gráficos com as curvas força-deslocamento, obtidas com a média dos valores medidos nos transdutores de deslocamento D8 e D9, e D12 e D13, que comparam os estreitamentos e os alargamentos na largura das colunas dos protótipos respetivamente nas zonas superior e inferior da ligação.

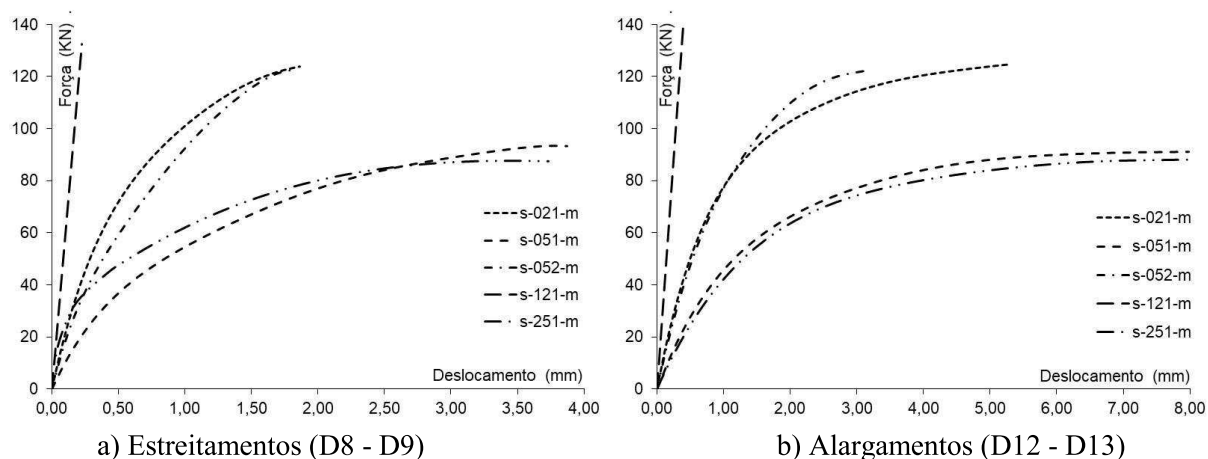


Fig. 12: Curvas força-deslocamentos na largura das colunas tubulares

Analogamente às considerações efetuadas relativamente aos outros resultados, as curvas dos gráficos da Fig. 12 mostram que a rigidez das colunas é um fator determinante na deformação da ligação. As deformações nas paredes laterais da coluna são superiores nas situações de menor espessura e maior largura (S-051 e S-0251). Por outro lado, a coluna não apresenta estreitamentos e alargamentos significativos quando é preenchida com betão (valores obtidos inferiores a 0,4 mm).

4. 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 deste tipo de ligações, verificando-se alterações na resistência e rigidezes para a variação paramétrica considerada nos ensaios;
2. A espessura das colunas tubulares influencia de forma clara a rigidez da ligação. Com a variação deste parâmetro conseguimos definir em que zona da ligação as deformações plásticas são mais significativas, se na coluna tubular, se no perfil em U;
3. A largura das colunas é um parâmetro a considerar quando relacionada com a distância entre os banzos do perfil em U. Maiores relações entre a largura da secção da coluna e da área carregada implicam resistências e rigidezes inferiores. Justifica-se pelo 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. Os protótipos S-021 e S-052 apresentam um comportamento idêntico, apesar das colunas terem secções diferentes em termos de espessura e largura, o que confirma a dependência da rigidez global da ligação destes dois parâmetros;
5. O enchimento com betão das colunas aumenta a resistência e as rigidezes da ligação. Nestes casos a rigidez total da ligação apenas é condicionada pela rigidez do perfil em U;
6. Não se verificam diferenças notórias nos resultados entre os ensaios realizados sem e com esforço axial;
7. Nos modelos com maior espessura, com menor largura e quando são preenchidos com betão o comportamento da coluna pode considerar-se rígido.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa FERPINTA a oferta dos perfis tubulares que serviram de base para a fabricação dos protótipos de ensaio.

À Eng.^a Guiomar Vicente pela cedência do esquema (*) apresentado na Fig. 3.

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] CEN, Eurocode 3: Part 1.1: “General Rules and Rules for Buildings”, EN 1993-1-1, 2010.