

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO CÍCLICO DE LIGAÇÕES METÁLICAS ENTRE COLUNAS TUBULARES E VIGAS I

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 cíclicos, efetuados no âmbito da investigação do comportamento de ligações entre coluna tubular e viga, aparafusadas com recurso a perfis em U invertidos. O programa considera a variação de parâmetros respeitantes aos 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 submete a ligação a momento fletor e esforço transversal. Os resultados são apresentados na forma de curvas histeréticas momento-rotação, concluindo-se que os parâmetros considerados são influentes no comportamento global da ligação.

1. Introdução

Quando comparadas com outros perfis metálicos, as colunas tubulares apresentam um comportamento estrutural mais eficaz, considerando a sua capacidade de suportar cargas axiais, bom comportamento à flexão desviada, à torção e ao empenamento, além das vantagens relativas à manutenção e à estética.

No entanto, as soluções tradicionais de ligação de perfis tubulares a vigas em perfis abertos, como a ligação aparafusada com placa de extremidade ou a ligação soldada, ou são complexas devido há necessidade de acesso ao interior do perfil tubular, ou tornam-se dispendiosas devido ao processo de soldadura ser executado em obra. Por estas razões, as correntes de investigação não se têm dirigido para esta solução de ligação, resultando em insuficiências ao nível de códigos regulamentares e de métodos de análise para o seu dimensionamento.

A ligação 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.

O Eurocódigo 3 [1] fornece algumas regras para ligações soldadas entre perfis tubulares, incluindo também o cálculo da resistência para ligações com placas soldadas transversalmente, mas não para ligações aparafusadas. Contudo, devido à sua importância, este tema tem tido nos últimos anos várias contribuições significativas, considerando a investigação experimental desenvolvida. Neste âmbito, destaca-se o trabalho do “Comité International pour le Développement et l’Étude de la Construction Tubulaire” CIDECT, visando o desenvolvimento de uma abordagem unificada de dimensionamento de ligações metálicas, de forma a alargar o campo de aplicação do método das componentes do Eurocódigo 3 [2].

Neste enquadramento, foi desenvolvido um programa de ensaios experimentais à escala real, com o objetivo de caracterizar o comportamento global não linear deste tipo de ligações metálicas, usando um perfil em U invertido, soldado à coluna de seção tubular e aparafusado à placa de extremidade da viga de perfil em I, conforme mostram os esquemas da Fig. 1. Alguns dos resultados desta investigação, relativos aos ensaios cíclicos, são apresentados neste artigo.

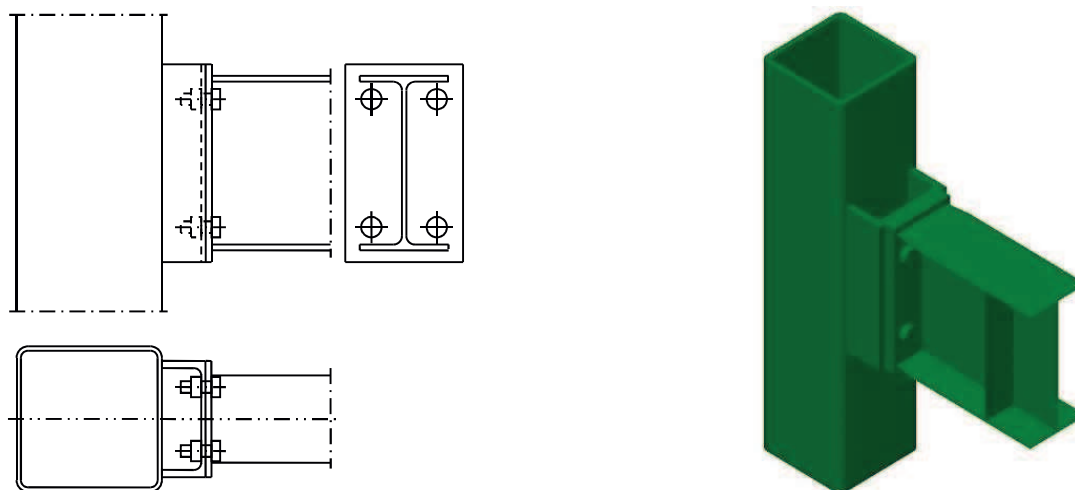


Fig. 1: Esquemas da ligação da viga à coluna SHS

2. Programa de ensaios experimentais cíclicos

2.1 Estudo paramétrico

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

- Espessura (t_c);
- Largura (w_c);
- Preenchimento ou não com betão;
- Esforço axial.

As dimensões e as características dos perfis tubulares dos ensaios experimentais, constituindo os parâmetros variáveis do estudo, são indicadas na Tabela 1.

As características e dimensões do perfil em U, da viga e da placa de topo são parâmetros fixos em todos os protótipos, Na Tabela 2 são indicadas as características e as dimensões do perfil em U.

O protótipo do perfil em U com estas características e dimensões, designado por A-13, já foi testado experimentalmente em ensaios denominados “ensaios de componentes”, substituindo a ligação à coluna tubular por uma ligação soldada a uma estrutura rígida e indeformável. Nesses ensaios foi efetuado um estudo da variação dos parâmetros dimensionais do perfil em U.

Tabela 1: Dimensões dos protótipos dos ensaios experimentais

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	8	Não	400KN	S-251

Tabela 2: 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

2.2 Protótipos de ensaio

Os protótipos são formados pelo perfil tubular, com duas placas de 15 mm de espessura soldadas na extremidade, para fazer a ligação com parafusos ao layout de testes.

Ao perfil tubular é soldado o perfil em U, em aço da classe S275, constituído por duas chapas de banzo soldadas a uma placa de alma com quatro furos para permitir aparafusar à chapa de topo da viga.

A viga corresponde a um perfil IPE300 com chapa de topo soldada, da classe de resistência S355, ambas com alta resistência à flexão [3] quando comparadas com a da coluna e do perfil em U.

Os parafusos e porcas, tamanhos M24, são da classe de resistência 10.9.

A Fig. 2 mostra alguns pormenores dos protótipos de ensaio.

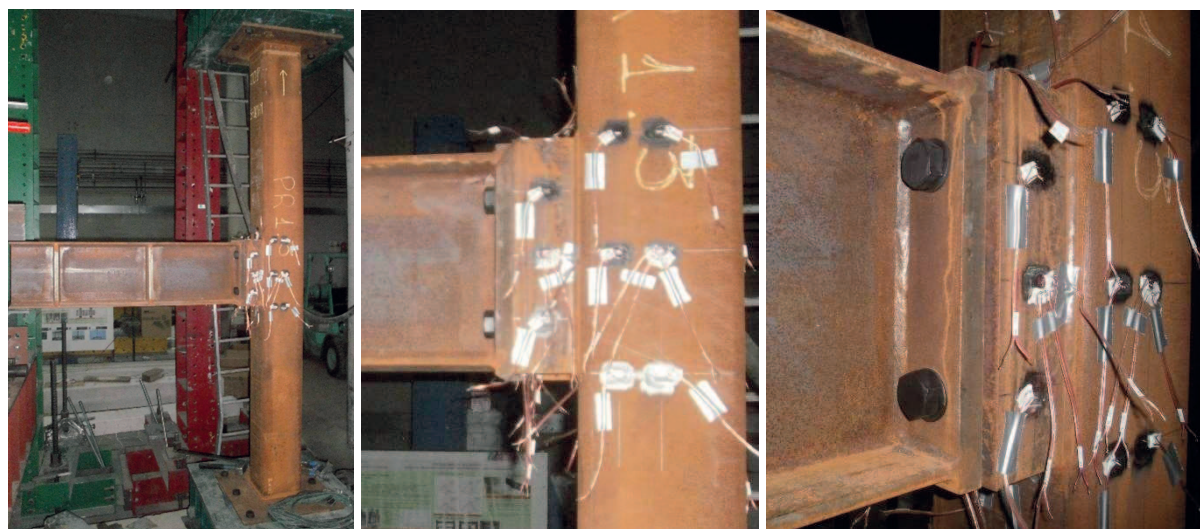


Fig. 2: Aspectos dos protótipos de ensaio

2.3 Layout dos ensaios

O layout de ensaios corresponde a uma estrutura em pórtico constituída por perfis HEB e IPE reforçados, encastrada 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 imagens com a perspetiva geral e um esquema (*) 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.

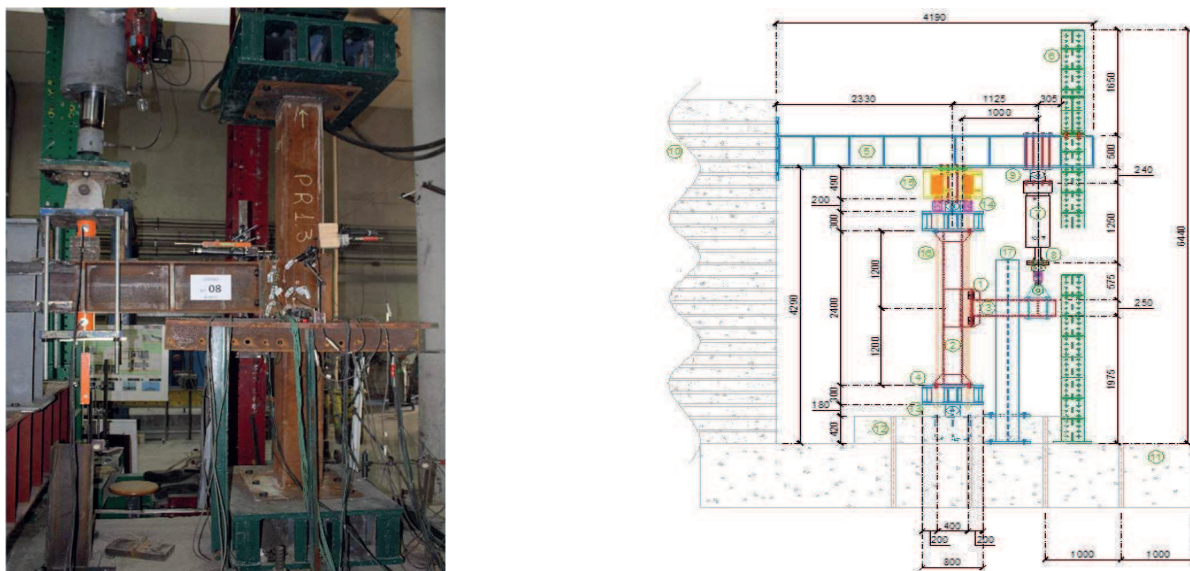


Fig. 3: Perspetiva geral e esquema do layout



Fig. 4: Detalhes do layout

2.4 Solicitações e dispositivos de medição

Os testes foram realizados com um atuador de 100 tf, em controlo de deslocamento, 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.

A estratégia de carregamento dos ensaios corresponde ao procedimento de carregamento recomendado pelo documento da ECCS para testes cíclicos [4], conforme a Fig. 5. Os valores usados foram determinados com base no deslocamento elástico obtido nos ensaios monotónicos através de fatores multiplicativos. Estes fatores multiplicativos são 0,25, 0,5, 0,75, 1, 2, 4, 6 e 8. A velocidade de ensaio para cada ciclo da estratégia de carga está indicada na Fig.5.

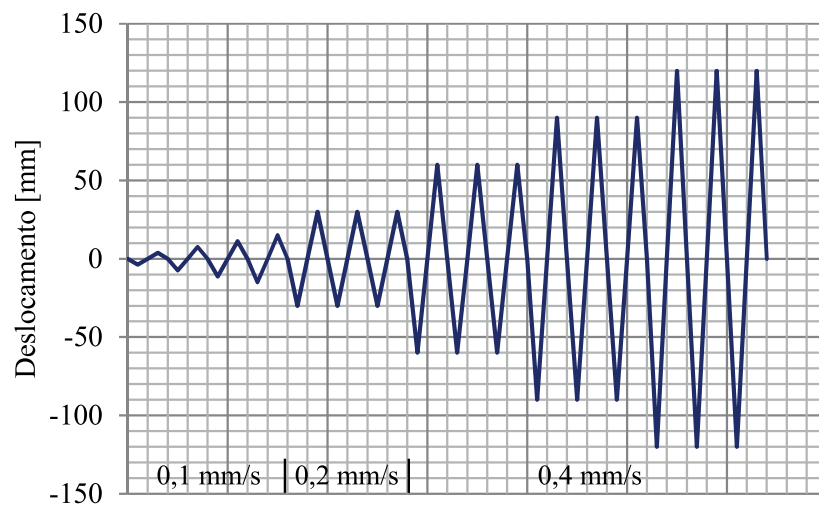


Fig. 5: Estratégia de carregamento

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. 6a.

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. 6b.

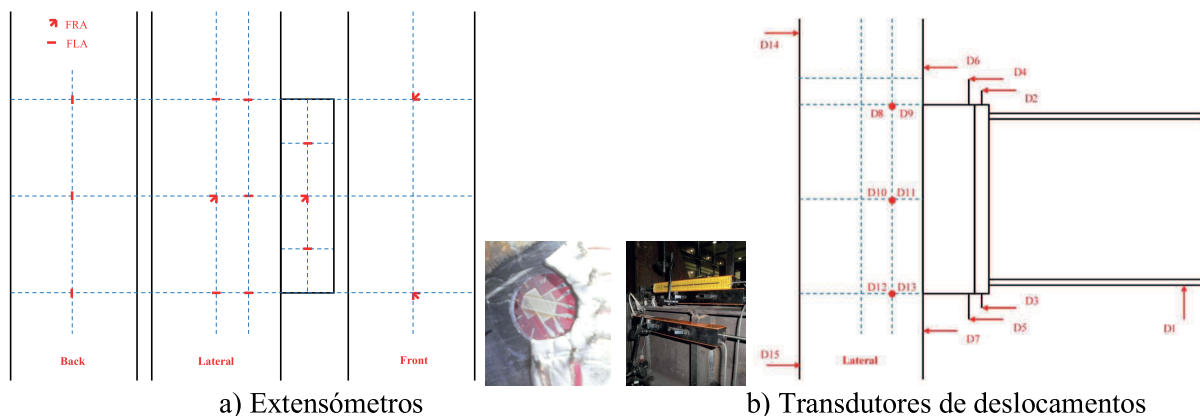


Fig. 6: Planos dos dispositivos de medição, dos extensómetros e dos transdutores de deslocamentos

3. Análise dos resultados dos ensaios

A sequência da Fig. 7 ilustra o layout durante a realização dos ensaios cíclicos.



Fig. 7: Layout na execução dos ensaios

3.1 Deformações e modos de rotura

As deformações do perfil em U são causadas alternadamente pela tração dos parafusos e pela compressão da chapa de topo da viga. As deformações das colunas na zona da ligação, apresentam 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 largura das paredes da coluna é menor, a espessura é superior, ou quando é preenchida com betão, caso dos protótipos S-021, S-052 e S-121, as deformações são maiores no perfil em U. Nas situações opostas, casos dos protótipos S-051 e S-251, as chapas das faces da coluna são aquelas que maiores deformações plásticas evidenciam. Na Fig. 8 são visíveis as deformações plásticas nos elementos.



Fig. 8: Deformações plásticas nos elementos

Influenciados pela rigidez dos elementos os modos de rutura verificados são diferentes e diversificados, conforme se pode observar na Fig. 9, tendo-se identificado as seguintes principais formas:

- A - Arrancamento dos cordões de soldadura da alma com o banzo do perfil em U;
- B - Arrancamento dos cordões de soldadura dos banzos do perfil em U com a face da coluna;
- C - Rompimento da chapa da face da coluna;
- D - Escorregamento da porca no parafuso com alisamento da parte roscada.



Fig. 9: Modos de rotura

A tabela 3 indica os modos de rotura verificados nos protótipos nos nove ensaios cíclicos.

Tabela 3: Modos de rotura verificados

Modo	A		B		C		D		Rotura Total
	sup	inf	sup	inf	sup	inf	sup	inf	
S-021-C	X				X	X			
S-021-CC	X							X	
S-051-C					X	X			
S-051-CC					X	X			
S-251-C					X	X			
S-052-C			X	X					X
S-052-CC	X	X	X	X					
S-121-C							X	X	
S-121-CC	X	X							

Nos protótipos em que a espessura das paredes da coluna é menor, 8 mm, a rotura ocorre por rompimento da chapa da face da coluna, exceto no protótipo preenchido com betão (S-121-CC), em que a rotura ocorreu num dos cordões de soldadura da alma com o banzo do perfil em U. Quando a rigidez da chapa da face da coluna é maior (espessura de 10 mm), a rotura ocorre com o arrancamento dos cordões de soldadura. Nos protótipos S-021-CC e S-121-C a perda de rigidez na ligação deveu-se ao escorregamento da porca no parafuso com alisamento da parte roscada.

3.2 Curvas histeréticas momento-rotação

Na Fig. 10 são apresentados os resultados na forma de curvas histeréticas momento-rotação, obtidas com os deslocamentos medidos no transdutor de deslocamentos D1, identificado na Fig. 6, em que se avaliou a rotação total da ligação, medida relativamente ao eixo da coluna. As curvas histeréticas apresentam os valores do momento-rotação até ao final dos ciclos de 90 mm, não se incluindo os valores para os ciclos de 120 mm, devido à rotura se ter verificado antes destes ciclos em quase todos os protótipos.

Analisando as curvas histeréticas, é evidente a diferença de rigidez pós elástica global entre os diversos protótipos, devida aos diferentes elementos da ligação que são mobilizados em cada caso. Os protótipos S-121, no qual a coluna é preenchida com betão, apresenta maior rigidez, ao contrário dos protótipos S-051, com a coluna de paredes de maior largura e menor espessura.

Na Tabela 4 são indicados os valores da carga máxima no pico de cada ciclo de 60 e 90 mm.

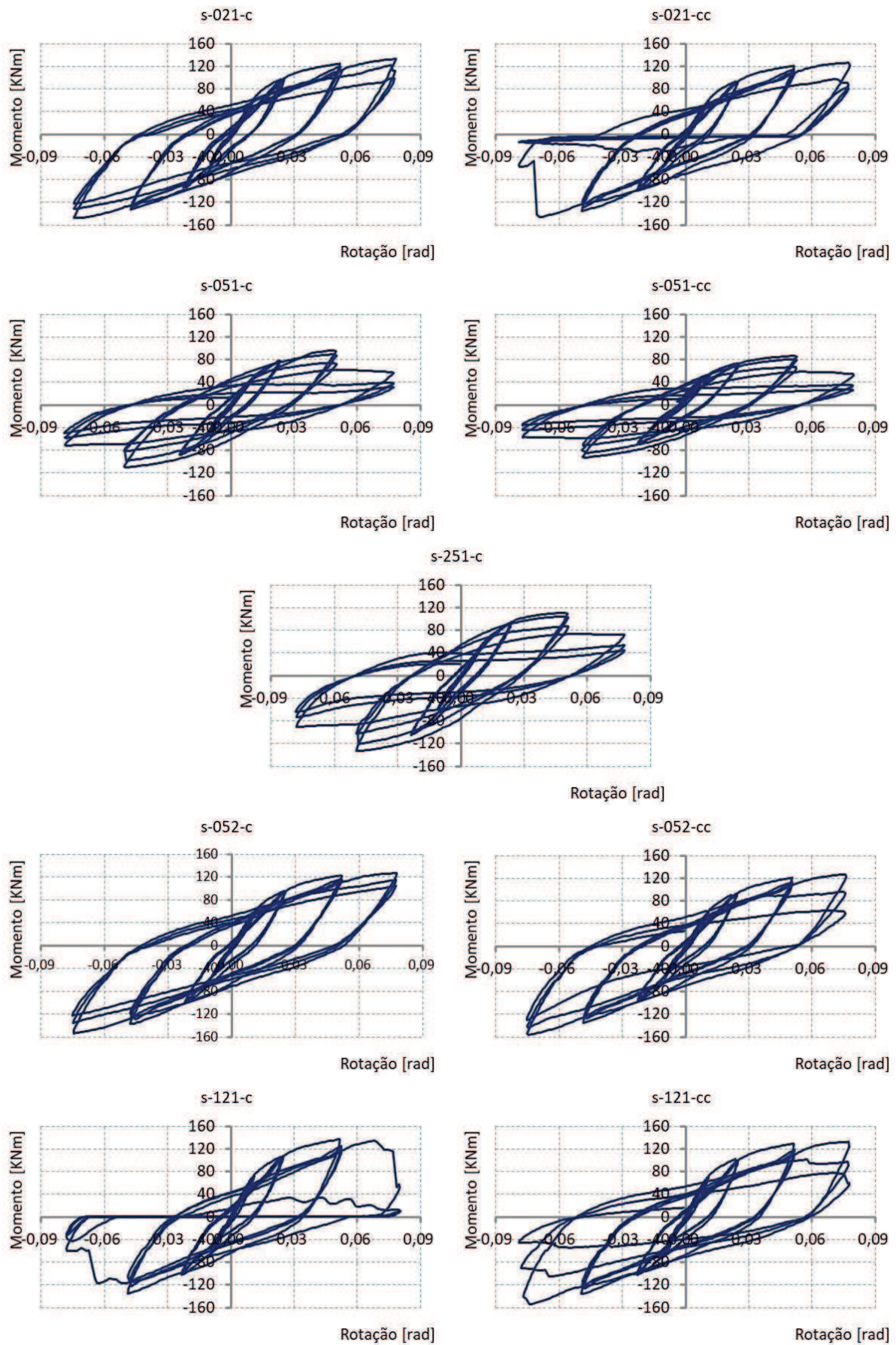


Fig. 10: Curvas histeréticas momento-rotação das ligações

Tabela 4: Carga máxima em cada ciclo de carga [KN]

Ciclos	60 mm						90 mm					
	1º		2º		3º		1º		2º		3º	
S-021-C	113	-119	108	-116	101	-114	120	-133	110	-119	89	-110
S-021-CC	108	-122	103	-116	99	-111	113	-131	87	-27	75	-12
S-051-C	86	-98	80	-88	66	-73	55	-64	35	-52	29	-44
S-051-CC	87	-93	81	-85	67	-71	58	-59	36	-45	27	-36
S-251-C	98	-118	92	-107	77	-91	65	-80	47	-65	39	-57
S-052-C	108	-122	103	-115	100	-113	112	-137	101	-120	92	-108
S-052-CC	107	-119	100	-113	97	-110	112	-139	85	-127	55	-115
S-121-C	123	-121	112	-110	106	-103	121	-105	30	-39	10	-29
S-121-CC	117	-123	107	-114	102	-112	120	-139	91	-95	70	-49

Na Fig. 11 são apresentados de forma comparativa, gráficos com a evolução da carga no decorrer dos ciclos de 60 e 90 mm, que refletem as diferenças dos resultados das variações paramétricas mais relevantes dos ensaios.

O efeito da variação da espessura das paredes da coluna pode ser verificado comparando os resultados dos protótipos S-051-C e S-052-C, em que há um aumento de rigidez, mais acentuado nos ciclos de 90 mm. Na variação da largura das faces da coluna, também é notório a menor rigidez quando a largura é maior, neste caso comparando os resultados dos protótipos S-021-C e S-051-C. O preenchimento com betão, não altera de forma significativa a rigidez da ligação, apenas pontualmente nos últimos ciclos, isto se compararmos os resultados nos protótipos S-021-C e S-121-CC. Neste caso temos de considerar que nestes protótipos os banzos do perfil em U exercem tração e compressão mais alinhada com as paredes laterais da coluna, zona em que a rigidez conferida pelo betão não é tão mobilizada. Existe variação da rigidez da ligação com o esforço axial na coluna, embora de forma menos significativa, comparando os gráficos dos protótipos S-051-CC e S-251-C.

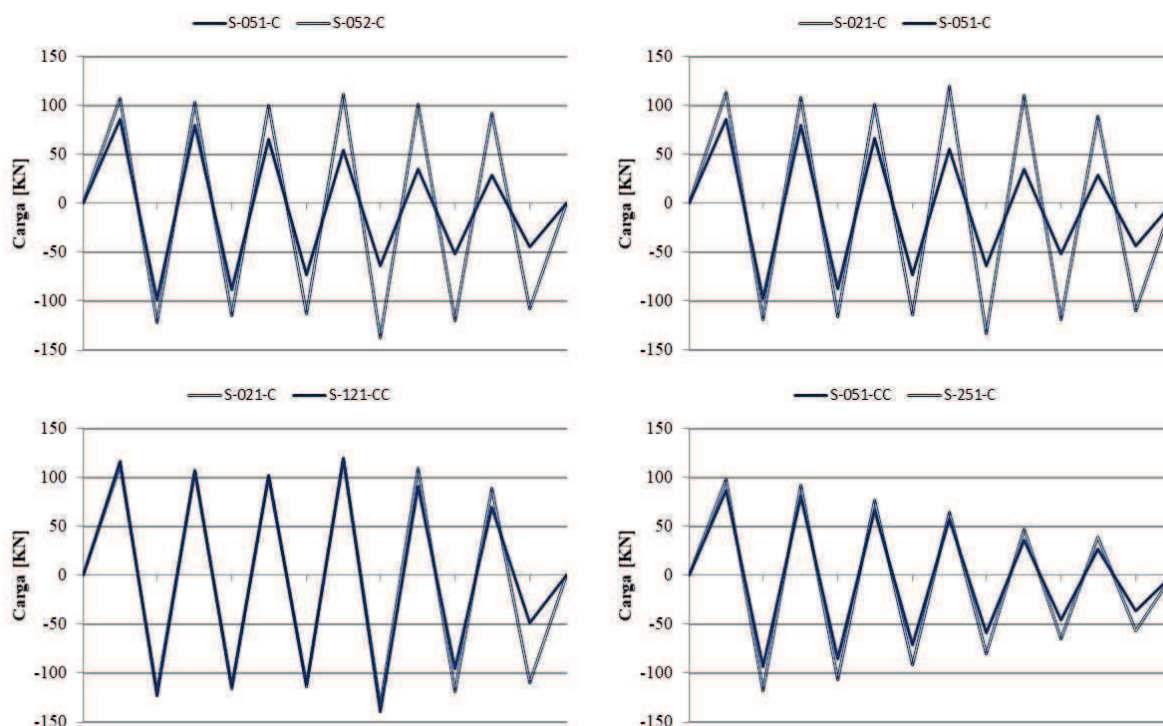


Fig. 11: Gráficos comparativos da evolução da carga nos ensaios

A deformação da alma do perfil em U é determinante na rotação da ligação nos casos em que há maior rigidez na coluna (protótipos S-052, S-021 e S-121), conferindo a esta zona da ligação mais resistência e rigidez. Na situação contrária, espessura inferior e largura superior da coluna (protótipos S-051 e S-251), as deformações estão concentradas nas paredes das colunas, contribuindo em grande parte para a rotação da ligação.

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, confirmado pelos diversos resultados obtidos com a variação paramétrica dos ensaios;
2. A espessura da secção das colunas é parâmetro determinante na rigidez da ligação. Com a variação deste parâmetro conseguimos localizar qual a zona da ligação que é mais mobilizada, se da coluna tubular, se do perfil em U;
3. A largura das colunas é um parâmetro influente 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 menor rigidez da ligação, sendo esta condicionada pela flexão da face soldada ao perfil em U. Para relações pequenas, a força transmitida pelos banzos é suportada pelas faces laterais das colunas, dando maior rigidez à ligação;
4. O enchimento com betão melhora a rigidez da coluna, minorando as deformações plástica nas faces, passando a rigidez da ligação a ser condicionada pela rigidez do perfil em U;
5. O esforço axial pode ter influência no comportamento da ligação, visto haver uma pequena diferença nos resultados obtidos;
6. O arrancamento dos cordões de soldadura, quer da ligação do perfil U à coluna quer entre os banzos e a alma, é o modo de rotura mais frequente, ocorrendo também rotura por rompimento da chapa da face da coluna nos protótipos com as chapas de menor espessura;
7. Os protótipos S-021-C e S-052-C apresentam um comportamento muito semelhante, mesmo tendo colunas de secção diferentes em espessura e largura, o que certifica a dependência da rigidez global da ligação da conjugação destes dois parâmetros.

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] IPQ, Eurocódigo 3: Parte 1.8: “Projeto de ligações”, EN 1993-1-8, 2010.
- [2] Jaspert 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] IPQ, Eurocódigo 3: Parte 1.1: “Regras gerais e regras para edifícios”, EN 1993-1-1, 2010.
- [4] ECCS, “Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads”, ECCS N.º 45, 1986.