

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES METÁLICAS COM PERFIL EM U INVERTIDO SOLDADO EM COLUNAS TUBULARES

Luís B. Magalhães^{1*}, Carlos S. Rebelo² e Sandra Jordão²

1: Unidade Técnico-Científica de Engenharia Civil
Escola Superior de Tecnologia
Instituto Politécnico de Castelo Branco
Av. do Empresário, 6000-767 Castelo Branco
e-mail: lmbmagalhaes@ipcb.pt, web: <http://www.est.ipcb.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos, Polo II da Universidade, 3030-788 Coimbra
e-mail: {crebelo,sjordao}@dec.uc.pt web: <http://www.dec.uc.pt> <http://www.uc.pt/ctuc/dec>

Palavras-chave: Ligações viga-coluna, perfil em U invertido soldado, comportamento monotónico e cíclico, ensaios de componentes, perfil tubular.

Resumo. *O principal objetivo da investigação apresentada é a caracterização experimental do comportamento cíclico não linear de ligações metálicas entre vigas de perfil em I e colunas tubulares com perfis em U invertidos de secção soldada.*

Quando comparados com outros perfis metálicos, os perfis tubulares apresentam melhor comportamento estrutural, devido à sua capacidade de suportar cargas axiais, flexão em várias direções e torção, além das vantagens consideráveis em termos de manutenção e estética, a um custo razoável. No entanto, apresentam dificuldades associadas às ligações, principalmente a vigas de perfil em I.

A utilização de perfis em U invertidos soldados à coluna tubular e aparafusados a vigas com placa de extremidade tem-se mostrado uma boa solução quando se conjuga o custo de construção, a facilidade de implementação e a ductilidade obtida através da deformação da alma do perfil em U. O tipo de ligação descrito apresenta vantagens mas, o seu comportamento não está caracterizado.

Neste artigo são apresentados resultados relativos à investigação experimental sobre o comportamento das componentes do perfil em U da ligação. O comportamento das principais componentes do perfil em U (painel da alma em flexão, painéis dos banzos em corte, compressão e tração) é avaliado por meio de ensaios experimentais de flexão (monotónicos e cíclicos). O objetivo principal destes ensaios é caracterizar a resistência, rigidez e capacidade de rotação das principais componentes da ligação relacionadas com o perfil em U.

Os resultados do estudo permitem apresentar o comportamento deste tipo de ligações quando os parâmetros relativos ao perfil em U variam. A área carregada, as espessuras e larguras da alma e dos banzos são parâmetros com influência no comportamento estrutural da ligação.

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. O fato da utilização dos perfis tubulares na concepção de estruturas não ser uma solução corrente, deve-se a aspetos associados com as ligações. 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 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 de secção soldada invertidos (Channels) é uma boa solução para o caso das ligações entre vigas de perfil em I e colunas tubulares (Figura 1), dado que têm um custo de construção razoável, são fáceis de implementar e possuem uma grande ductilidade através da deformação do painel da alma do perfil em U.

O presente artigo apresenta alguns resultados da investigação experimental sobre o comportamento das componentes do perfil em U quando sujeito a flexão.



Figura 1. Perfil em U invertido soldado.

2. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Além da determinação da capacidade de rotação da ligação através da deformação do perfil em U, o objetivo desta investigação é determinar a resistência e a rigidez das componentes da ligação relacionadas com a alma e os banzos do perfil U, a partir da execução de ensaios de componentes em flexão com carregamentos monotónicos e cíclicos.

2.1. Parâmetros do estudo experimental

Os protótipos de ensaio são formados pelo perfil em U (duas placas de banzo soldadas à placa da alma com 4 furos para aparafusar à placa de extremidade da viga em I na qual é aplicada a carga) (Figura 2). A classe de resistência do aço é S275.

O comportamento do perfil em U invertido soldado é condicionado pelas componentes da sua alma e banzos: placa da alma em flexão e placas de banzos em corte, compressão e tração.

As configurações selecionadas para os ensaios experimentais correspondem a uma variação

paramétrica dos fatores de maior influência no comportamento estrutural do channel. Estes parâmetros são a espessura e largura das placas da alma e dos banzos, a distância entre os parafusos na mesma fiada e a geometria da placa de extremidade da viga (Figura 2). As dimensões dos protótipos são indicadas na Tabela 1.

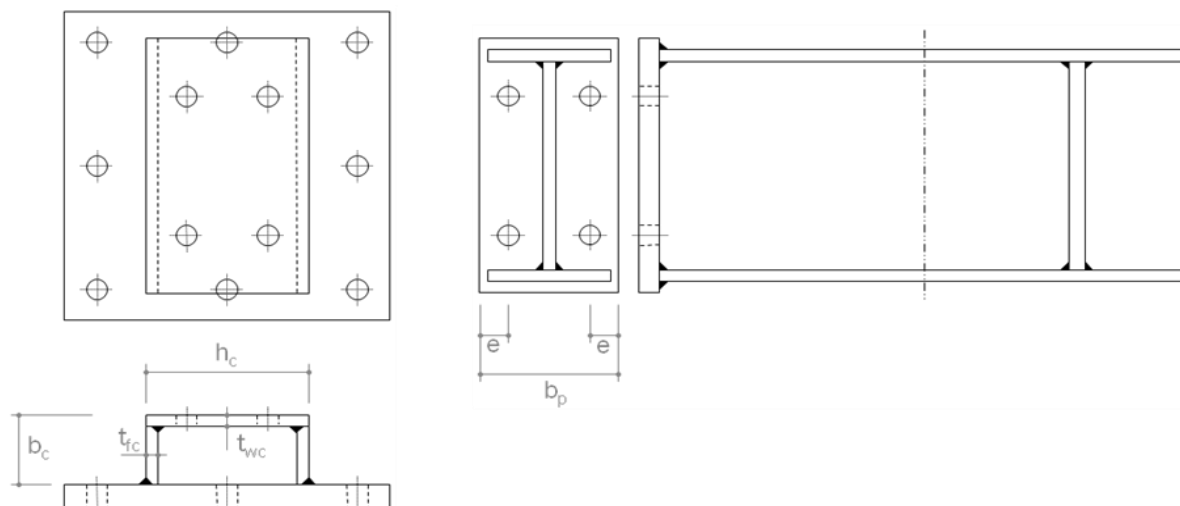


Figura 2. Esquema do protótipo e da viga.

Tabela 1. Dimensões dos protótipos.

P	p ₂ (mm)	b _c (mm)	h _c (mm)	t _{wc} (mm)	t _{fc} (mm)	Protótipo	Placa de extremidade da viga	
							b _p (mm)	e (mm)
1	85	90	200	12	15	A-11	155	35
2			15	A-12				
3				A-13				
4				A-14				
5	100	200	15	A-15	170	35		
6	80			A-16	170	45		
7	100			75	10	A-17	170	35
8		A-18						

2.2. Lay-out de ensaio

O lay-out dos ensaios experimentais corresponde a uma ligação viga coluna, entre um perfil em I e uma estrutura vertical rígida em aço através do channel invertido (Figura 3). Tendo em conta que o objetivo é analisar o comportamento do channel, todos os outros elementos da ligação têm rigidez suficiente para se considerarem indeformáveis. O perfil em U está diretamente soldado a uma placa rígida (25 mm de espessura e classe S355), que para facilitar a montagem e desmontagem dos protótipos, liga à estrutura vertical através de 8 parafusos (M24 - 10.9). A viga é um perfil IPE300 (S355) com grande rigidez à flexão [3] quando comparada com a do perfil em U, incorporando no extremo um sistema de rolamentos vertical que impede os deslocamentos fora do seu plano.



Figura 3. Lay-out de ensaio.

2.3. Instrumentação

Foram usados defletómetros para medir todos os componentes da rotação da ligação e para avaliar os deslocamentos em pontos significativos da estrutura (Figura 4).

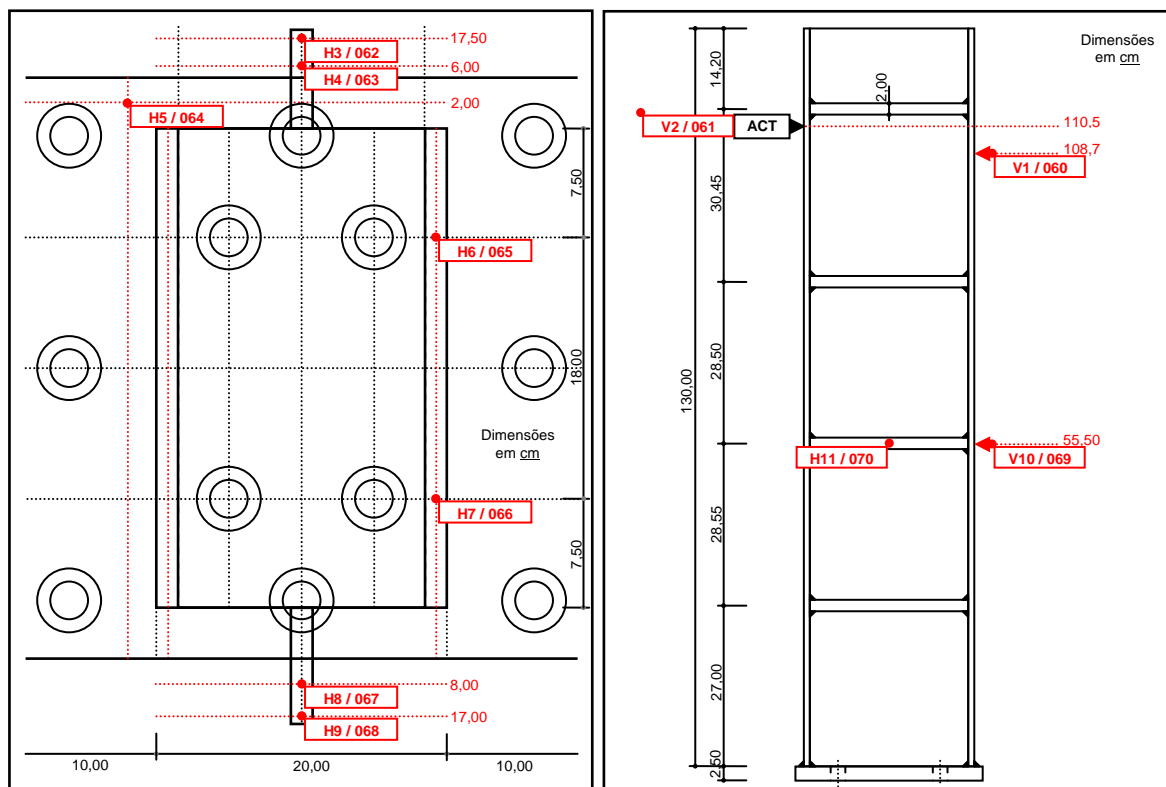


Figura 4. Esquema de colocação dos defletómetros (à esquerda no perfil em U e à direita na viga).

Também se utilizaram extensómetros para medir as extensões e avaliar o estado de tensão em vários pontos do perfil em U, assim como as extensões nos parafusos. A figura 5 apresenta um esquema com os pontos onde foram colados extensómetros.

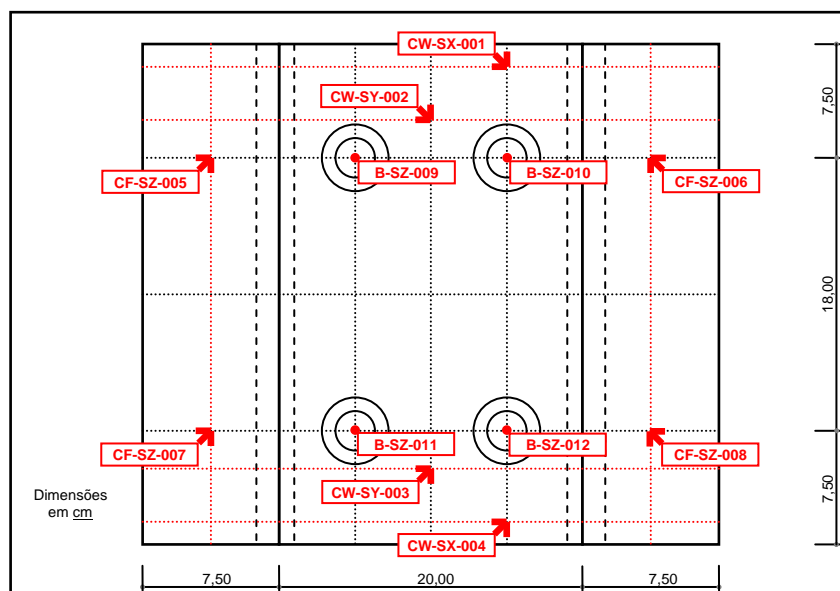


Figura 5. Esquema de colocações dos extensómetros.

2.4. Solicitação

A estratégia de carregamento dos ensaios cíclicos corresponde ao procedimento de carregamento recomendado pelo documento da ECCS para testes cíclicos [4] (Figura 6).

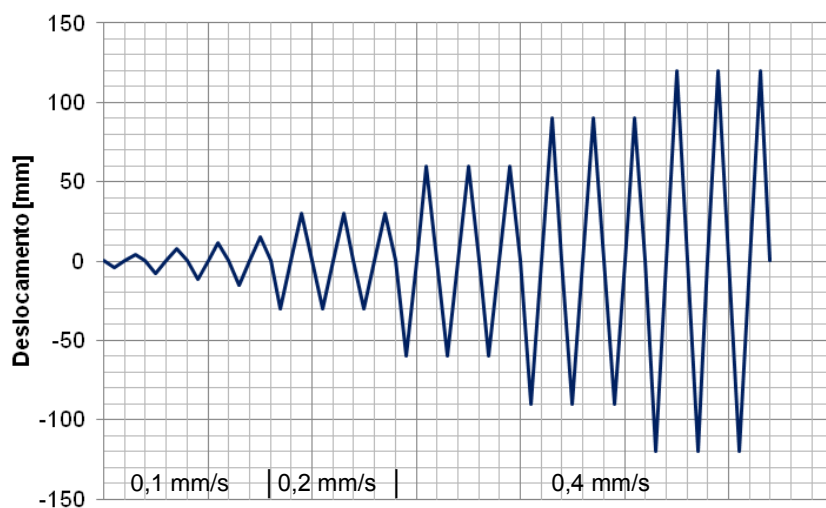


Figura 6. Estratégia de carregamento cíclico.

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 figura 6. Os ensaios experimentais, monotónicos e cíclicos, foram executados com controlo de deslocamento. Para efetuar os ensaios foi utilizado um atuador hidráulico de 100 tf, o qual é conectado à viga através de um dispositivo articulado de forma que a carga aplicada permaneça ortogonal à viga durante o ensaio. O carregamento aplicado à estrutura é medido por meio de células de carga, uma colocada entre o atuador e a viga e outra abaixo do banzo inferior da viga, conforme ilustra a figura 3.

3. RESULTADOS

A figura 7 mostra o lay-out de ensaios no início e no final de um ensaio monotónico. Pode verificar-se a deformação significativa no perfil em U após o deslocamento imposto na viga.



Figura 7. Lay-out de ensaios no início e no final dos ensaios.

3.1. Ensaio monotónicos

Nos ensaios monotónicos a deformação dos perfis é causada pela tração dos parafusos na zona da fiada superior (Figura 8) e pela compressão da placa de extremidade da viga na zona inferior da alma do perfil (Figura 9). Em ambos os casos podem observar-se deformações plásticas significativas.

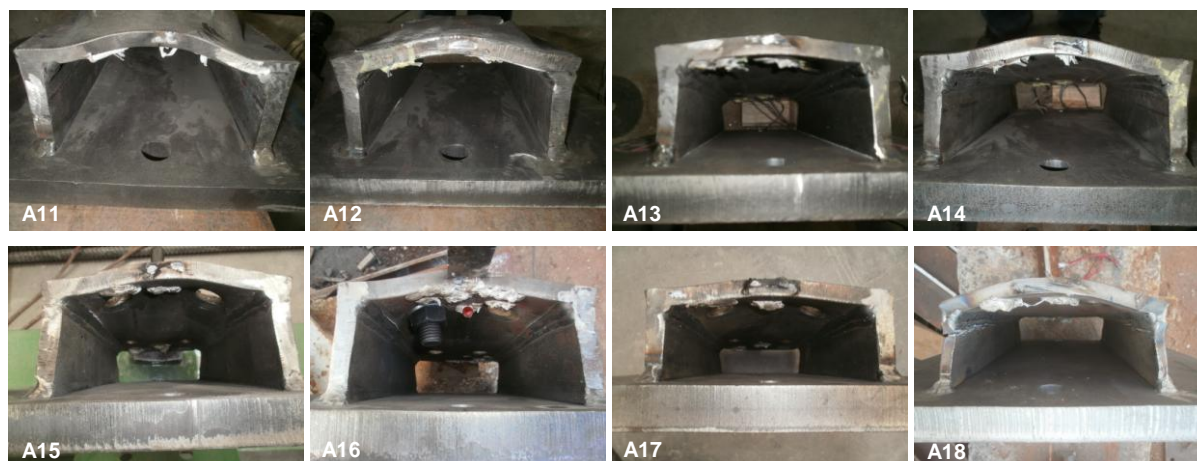


Figura 8. Deformação na zona superior dos protótipos nos ensaios monotónicos.

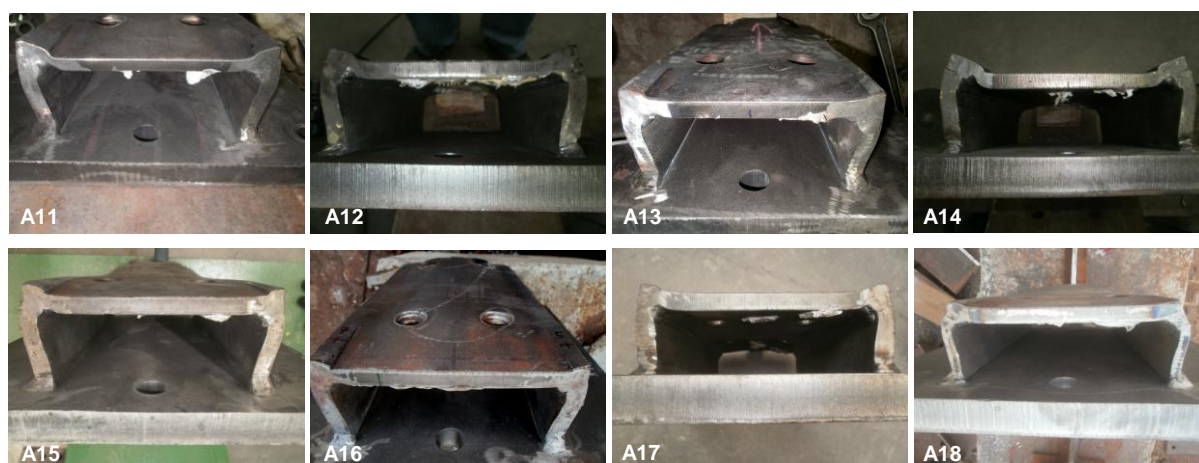


Figura 9. Deformação na zona inferior dos protótipos nos ensaios monotónicos.

O protótipo A-11 evidencia a maior deformação plástica na zona da fiada dos parafusos tracionados e uma das deformações por compressão da viga na zona inferior mais significativa, devido ao fato de ser o protótipo que tem a placa de alma mais fina relativamente aos outros (12 mm).

O protótipo A-14 é o que sofre a maior deformação na zona inferior, devido ao fato de ser o que tem a placa de alma mais larga (220 mm), aumentando assim a deformação por flexão.

O protótipo A-18 foi o único que atingiu a rotura por rompimento das placas de banzo, como se pode observar na figura 8. Este protótipo é o que tem os banzos com menor espessura (10 mm).

Os resultados dos ensaios monotónicos são apresentados na figura 10 em termos de curvas momento-rotação.

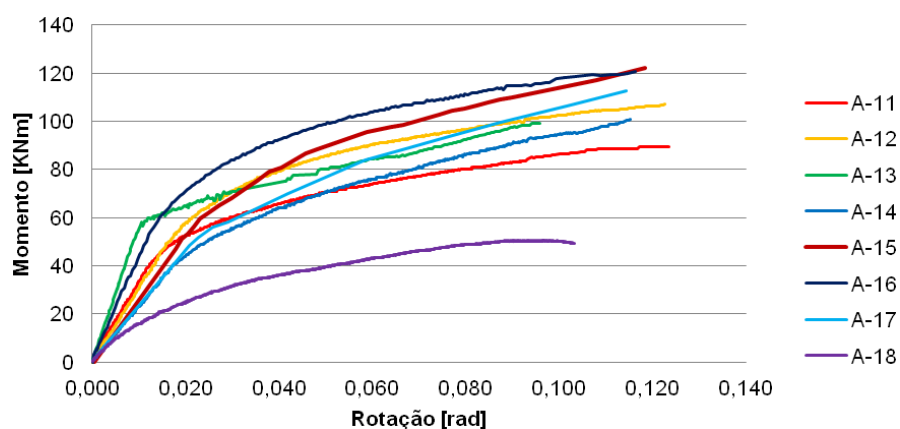


Figura 10. Diagramas momento-rotação para os ensaios monotónicos.

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) [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 rotação máxima (não

avaliada no presente 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 valores dos resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 2. Momento elástico e rigidezes.

Protótipo	Momento Elástico M_j [KNm]	Rotação Elástica [rad]	Rigidez Inicial $S_{j,ini}$ [KNm]	Rig. Pós Cedência $S_{j,pl}$ [KNm]
A-11	42,4	0,0133	3188,0	285,7
A-12	53,7	0,0177	3033,9	292,2
A-13	53,7	0,0095	5652,6	454,2
A-14	41,5	0,0180	2305,6	441,3
A-15	52,2	0,0197	2649,7	435,8
A-16	54,5	0,0126	4325,4	340,7
A-17	48,8	0,0208	2346,2	420,3
A-18	10,2	0,0054	1888,9	328,9

Os resultados dos ensaios monotónicos mostram que a espessura e a largura da placa da alma são parâmetros com significativa influência no comportamento global da ligação. Quando a espessura da alma diminui o valor do momento elástico decresce (Comparar os resultados de A-11 e A-12). Aumentar ou diminuir a largura da alma envolve variações significativas da rigidez, quando se mantém constante a largura da placa de extremidade da viga, porque a variação deste parâmetro altera a rigidez de flexão da placa da alma. O protótipo A-14, que é o exemplo com a maior largura da alma, é o que tem a menor rigidez inicial entre os protótipos com espessura de banzos de 15 mm.

A variação da área carregada, com influência na zona de compressão através da largura da placa de extremidade da viga, e na zona de tração pela distância entre parafusos, é também um parâmetro importante na rigidez da ligação. Maior rigidez é obtida quando a carga é aplicada mais próxima dos banzos do channel na zona de compressão, ou seja, quando a largura da placa de extremidade é aproximada da largura da alma, caso do protótipo A-13, e quando o afastamento entre parafusos na zona de tração é menor, neste caso o protótipo A-16.

A influência da variação da espessura dos banzos é evidente quando comparamos os resultados dos protótipos 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. A variação da largura dos banzos não evidencia alterações notórias do comportamento, isto porque a variação efetuada com este parâmetro é insuficiente para alterar de forma significativa a esbelteza dos banzos.

Na tabela 3 é apresentada em síntese a influência da variação dos parâmetros do perfil em U.

Tabela 3. Síntese do estudo paramétrico.

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

3.2. Ensaio cíclicos

Nos ensaios cíclicos a rotura das ligações ocorreu durante os cíclicos de carregamento de 120 mm (Protótipos A-11, A-14, A-15 e A-16) e de 90 mm (Protótipos A-17 e A-18) (Figura 11).

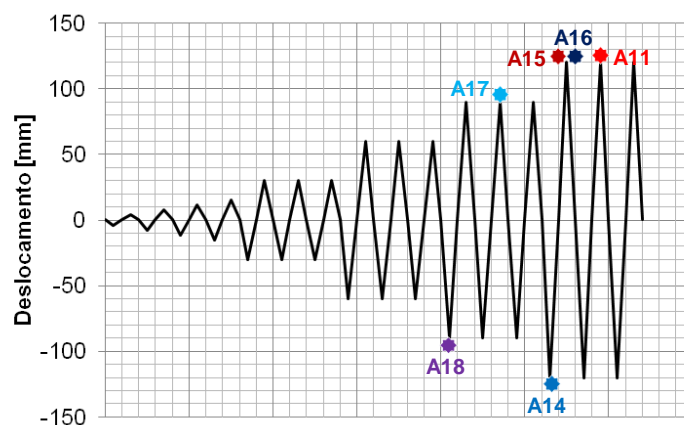


Figura 11. Localização da rotura da ligação para cada um dos ensaios cíclicos.

Maioritariamente, a rotura das ligações foi devida à quebra dos cordões de soldadura entre a alma e os banzos na zona inferior do channel, nesse momento tracionada (zona que foi comprimida no início de cada ciclo), como ilustram as figuras 12a e 12b para os protótipos A-11, A-14, A-15, A-16 e A-17. Exceção a este tipo de rotura, há semelhança do ensaio monotónico, o protótipo A-18 rompeu nas placas de banzo. A figura 13 mostra a ligação no final do ensaio com a rotura numa placa de banzo. Durante o ensaio, o protótipo A-13 não atingiu a rotura, tendo suportado todos os ciclos de carga até aos de amplitude de 120 mm. Neste caso, o comportamento da ligação foi condicionado pelo deslizamento da porca na parte roscada dos parafusos (Figura 14).

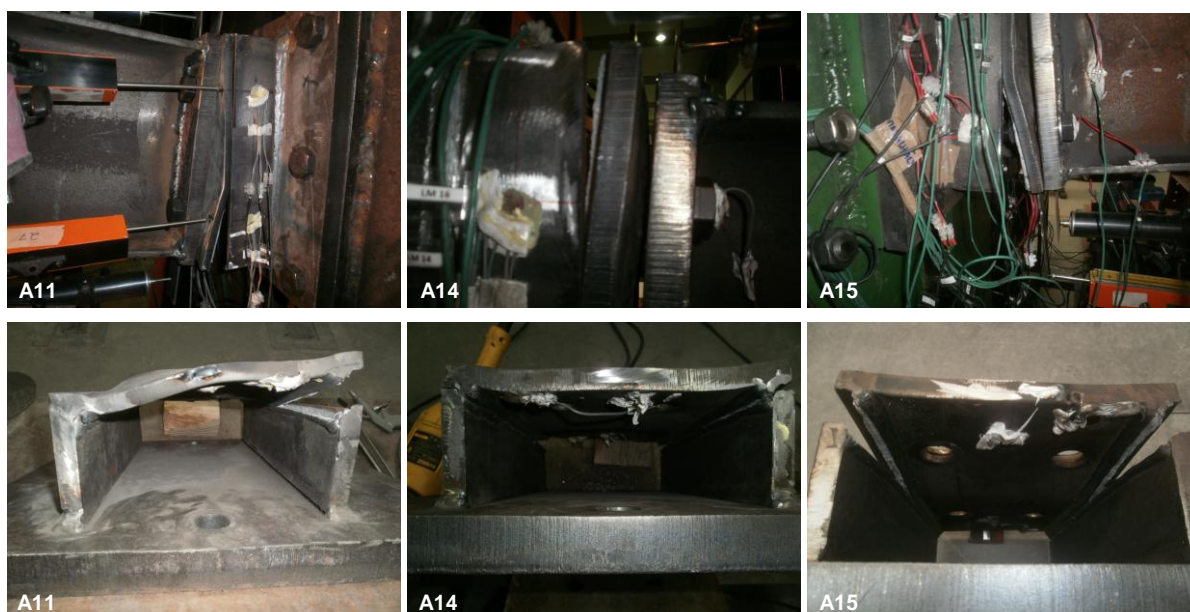


Figura 12a. Rotura dos cordões de soldadura nos protótipos A-11, A-14 e A-15.



Figura 12b. Rotura dos cordões de soldadura nos protótipos A-16 e A-17.



Figura 13. Rotura do protótipo A-18 nas placas de banzo.

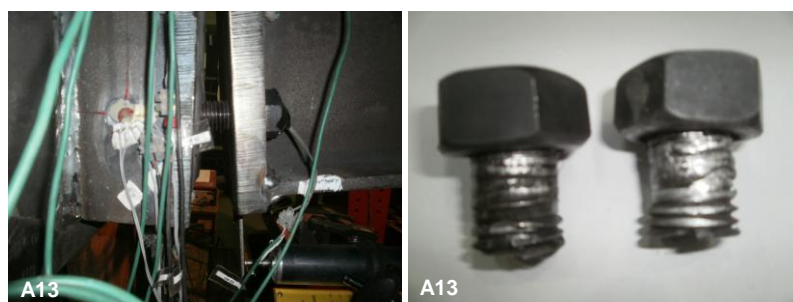


Figura 14. Detalhes do escorregamento dos parafusos na ligação A-13.

A figura 15 mostra os resultados dos ensaios cíclicos na forma de diagramas de curvas histeréticas momento-rotação.

Em todos estes diagramas é possível identificar os sucessivos ciclos da estratégia de carregamento. É notório que após o primeiro dos três ciclos de 30, 60 e 90 mm há um decréscimo da resistência da ligação.

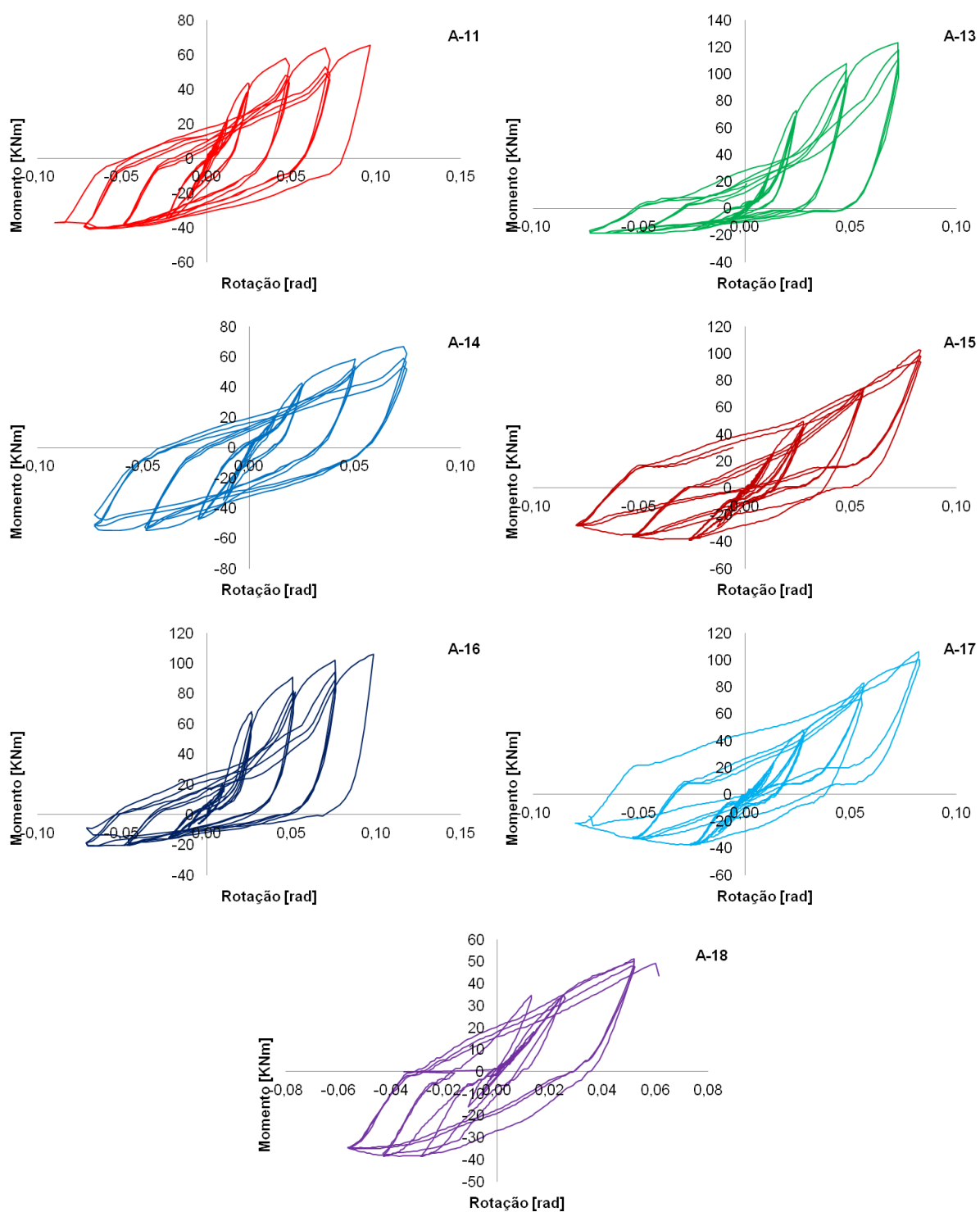


Figura 15. Diagramas de curvas histeréticas momento-rotação.

Destas curvas histeréticas podemos concluir que os comportamentos das ligações não são iguais nas rotações positivas e negativas. Esta situação é mais evidente nos diagramas dos protótipos A-13 e A-16. O comportamento histerético que apresenta a simetria mais perfeita é o que corresponde à ligação do protótipo A-14. Os ensaios monotónicos demonstram que este é um dos perfis com menor rigidez, e também o fato da aplicação da carga estar mais afastada dos banzos.

4. CONCLUSÕES

- A área carregada, as espessuras e larguras da alma e dos banzos são parâmetros de importante influência no comportamento estrutural das ligações viga-coluna com o perfil em U invertido, tendo-se verificado alterações significativas do comportamento estrutural para a variação paramétrica considerada no estudo.
- A resistência da ligação é superior quando a espessura da alma do perfil é maior, mas relativamente à rigidez não existem diferenças significativas. Esta conclusão é aceitável visto que apesar do aumento da espessura a configuração geométrica da ligação e os caminhos de transferência de carga não se alteram.
- A espessura dos banzos é dos parâmetros mais importantes, a sua diminuição implica perda de resistência e rigidez, visto que suportam compressão, tração e corte.
- Maiores relações entre as larguras da alma do perfil e da placa de extremidade da viga implicam baixas resistências e rigidezes. A justificação está no fato de para relações baixas, a força de compressão transmitida pela placa de extremidade é suportada pelos banzos do channel em compressão, dando maior resistência e rigidez à ligação, enquanto que na situação oposta a resistência e a rigidez são condicionadas pela alma do channel em flexão.
- A distância entre parafusos na fiada em tração 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.
- Nos ensaios cíclicos a resistência da ligação é condicionada pela resistência dos cordões de soldadura. A resistência diminui com os ciclos de carga e verifica-se um comportamento assimétrico entre ciclos de compressão e tração.

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] CEN, Eurocode 3: *“Design of Steel Structures”*, Part 1.1: *“General Rules and Rules for Buildings”*, 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).