



A: XXXIX-0000

## ESTUDO NUMÉRICO DE LIGAÇÕES SOLDADAS ENTRE COLUNAS EM PERFIS TUBULARES RETANGULARES E VIGAS DE SEÇÃO I

### NUMERICAL STUDY OF WELDED I-BEAM TO RHS COLUMN CONNECTIONS

Matheus M. de Oliveira (P)(1); Henrique T. G. de Barros (2); Arlene M. C. Sarmanho (3);  
Vinicius N. Alves (3); Lucas Roquete (4);

(1) Eng. Civil, MSc, Doutorando, Dep. Eng. Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

(2) Eng. Civil, MSc, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

(3) Dr. Prof., Dep. Eng. Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

(4) Dr. Prof., Dep. Eng. Civil, Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, Brasil.

Endereço para correspondência: matheusmoliveira4@gmail.com; (P) Apresentador

**Área temática:** Análise estrutural: Métodos computacionais

#### Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo numérico em elementos finitos para avaliação de ligações soldadas do tipo T entre colunas tubulares retangulares (RHS) e vigas de seção I sob momento fletor. A combinação entre colunas de perfis tubulares de aço e vigas de seções abertas pode ser uma boa opção para facilitar a execução e manutenção, reduzir custos e melhorar o projeto das estruturas. Esse tipo de ligação explora a qualidade de grande resistência a tração e compressão dos perfis tubulares e a boa capacidade resistente na flexão dos perfis abertos. As ligações entre esses perfis podem ser feitas por meio de soldas, que proporcionam uma concepção estrutural mais limpa. Dessa forma, uma avaliação da ligação tipo T entre esses perfis com modo de falha de plastificação na parede frontal foi realizada. Diferentes modelos de elementos finitos foram avaliados com a finalidade de validação do modelo numérico. Os tipos de elementos finitos utilizados, o tamanho da malha e a presença ou não da solda nos modelos foram estudados. Nesse contexto, o comportamento da curva momento-rotação e a distribuição de tensões foi avaliado. Além disso, o estudo apresentou os resultados de rigidez e capacidade resistente da ligação e identificar o modelo numérico que representa satisfatoriamente o comportamento da ligação.

*Palavras-chave: Estruturas metálicas, perfis tubulares, ligações tubulares, análise numérica*

#### Abstract

This paper presents a numerical study in finite elements for assessment of the welded I-beam to RHS column connections under in-plane bending moments. The combination of steel hollow section columns and open profiles beams can be a good option to facilitate execution and maintenance, reduce costs and improve the structures design. This connection exploits the high strength under tension and compression of the tubular profiles and the high moment resistance under bending of the I profile. The joints between these profiles can be performed through welds, which provide a clean structural concept. Thus, the T-joints with these profiles and column face plastification were evaluated. Different finite element models were developed with the objective of numerical model validation. The finite element type, the element size and presence or absence of welds in the models were studied. In this context, the moment-rotation curves and stress distribution were evaluated. Moreover, the study presented the stiffness and resistance capacity results and identified the numerical models that satisfactorily represent the behavior of the connection.

*Keywords: Steel structures, hollow sections, tubular joints, numerical analysis*



## 1. INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares apresentam características estruturais que os credenciam para aplicação em diferentes tipos de estrutura. Em concepções de pórticos em aço, é crescente a utilização de perfis tubulares exercendo a função de pilar, associados a perfis de seção “I” como vigas. Essa combinação garante ao projeto estética agradável, boa resistência aos esforços solicitantes característicos de uma ligação viga coluna, sendo predominantemente atrativa em edifícios de múltiplos andares (Barros, 2021).

A conexão entre esses perfis é usualmente realizada através de solda, devido a facilidade de execução, boa resistência aos esforços de flexão e aparência limpa. Outras metodologias de conexão podem ser utilizadas, como parafusos cegos (Málaga-Chuquitaype and Elghazouli, 2010) e pinos soldados (Serrano-López et al., 2021). Visando difundir a utilização dessas ligações por meio de solda, Lu (1997) foi pioneiro nos estudos e avaliou a capacidade resistente dessa ligação por meio de um estudo numérico e experimental. Os resultados dessa pesquisa foram posteriormente incorporados ao guia CIDECT (Wardenier et al., 2010).

O avanço da tecnologia e métodos numéricos impulsionaram o desenvolvimento de novas análises nessa tipologia de ligação, aliando economia de tempo e possibilidade de avaliação de um grande conjunto de dados. Assim, diversos estudos foram realizados para melhorias no processo de modelagem, avaliando a influência do tipo de elemento finito (Serrano-López et al., 2016), implementação da solda (Serrano-López et al., 2019) e variação dos parâmetros geométricos (Nunes, 2012). No entanto existe a necessidade de melhorias na avaliação do comportamento da ligação. Usualmente são realizadas avaliações por meio da análise da curva Momento-Rotação, sendo possível obter a rigidez inicial, capacidade resistente e de rotação. A obtenção dessa curva pode ser feita através de ensaios experimentais, métodos analíticos, mecânicos e numéricos.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da ligação soldada entre pilar de seção tubular retangular (RHS) e viga de seção “I”, sob flexão no plano por meio de um estudo numérico desenvolvido em um software comercial que utiliza o método dos elementos finitos para solução das análises. Nesse contexto, um estudo comparativo com resultados anteriores para avaliar a influência do elemento finito, comprimento da malha e implementação do cordão de solda é desenvolvido. Por fim, um modelo numérico que represente o comportamento da ligação é definido.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 Parâmetros geométricos

As ligações entre viga e colunas podem ser classificadas quanto a tipologia da ligação. As ligações estudadas nesse trabalho são denominadas ligações uniplanares, caracterizadas pela presença de uma viga conectada em apenas um plano da coluna, denominada ligação do tipo T. Na Figura 1 estão apresentadas as nomenclaturas utilizadas para a avaliação da ligação. Além disso, os parâmetros adimensionais comumente adotados em avaliações entre ligações tubulares de acordo com relações geométricas da viga e da coluna estão descritos.





### 3. ANÁLISE NUMÉRICA

#### 3.1 Elementos finitos

Para o desenvolvimento do modelo numérico de elementos finitos da ligação foram estudados quatro tipos de elementos finitos visando à amplificação do estudo, sendo eles: dois elementos de casca SHELL 181 e SHELL 281; e dois elementos de volume SOLID 185 e SOLID 186. Os elementos avaliados são os majoritariamente utilizados em estudos realizados recentemente (López-Colina et al., 2019; Matos et al., 2015; Pereira et al., 2019).

O elemento tipo casca SHELL 181 é um elemento com quatro nós e seis graus de liberdade por nó e que aceita malhas irregulares, possibilitando também a aplicação de forças em qualquer direção. O elemento tipo casca SHELL 281 apresenta oito nós com seis graus de liberdade cada. Ambos, possibilitam translações nos eixos X, Y e Z e rotações em torno dos eixos X, Y e Z.

O elemento finito de volume SOLID 186 possui vinte nós com três graus de liberdade por nó. O elemento finito de volume SOLID 185 apresenta oito nós com três graus de liberdade por nó. Todos os elementos possibilitam translações nos eixos X, Y e Z. O SOLID 185 é um elemento de ordem inferior ao SOLID 186.

No presente estudo a coluna e a viga da ligação foram avaliadas somente por meio da utilização de elementos de casca (SHELL 181 ou SHELL 281). A solda foi representada por todos os elementos descritos anteriormente (SHELL 181, SHELL 281, SOLID 185 e SOLID 186). A ligação sem a presença da solda também foi avaliada. Não foi realizada a combinação de dois elementos de casca diferentes. Assim foram elaborados 8 modelos de elementos finitos diferentes, com a nomenclatura apresentada na Figura 4.

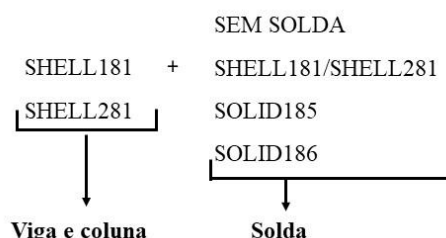


Figura 4. Nomenclatura dos elementos utilizados nos modelos

#### 3.2 Propriedades geométricas e de material

Para avaliação dos modelos numéricos desenvolvidos foram utilizados os parâmetros geométricos e de material de dados experimentais descritos em Barros et al. (2022 in submission). Na Tabela 1 estão apresentadas as propriedades geométricas e de material dos componentes da ligação. Foram utilizadas colunas de perfis tubulares retangulares de aço VMB 350 com módulo de elasticidade igual a 205 GPa. O aço das vigas de seção transversal I não foi caracterizado, sendo adotado os valores nominais para a avaliação do estudo: tensão de escoamento igual a 345 MPa, tensão última de ruptura igual a 450 MPa e módulo de elasticidade igual a 200 GPa.

Tabela 1. Propriedades geométricas e de material

Modelos	Coluna RHS					Viga Perfil I				Parâmetros adimensionais		
	$b_0$ [mm]	$h_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [Mpa]	$h_1$ [mm]	$b_1$ [mm]	$t_f$ [mm]	$t_{w1}$ [mm]	$\beta$	$2\gamma$	$\eta$
M1	200	150	6,4	468,0	620,7	203	102	6,5	5,8	0,51	31,25	1,02
M2	200	150	6,4	468,0	620,7	303	101	5,7	5,1	0,51	31,25	1,52



Para o desenvolvimento do modelo numérico, optou-se por utilizar o comportamento elasto-plástico com encruamento para representar a não linearidade do material. Esse diagrama é frequentemente utilizado para representar o comportamento do aço de perfis tubulares em análises numéricas. Assim, para a utilização desse diagrama são necessários os valores de tensão de escoamento ( $f_{y0}$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e do módulo de elasticidade tangente ( $E_t$ ), considerado igual a  $E/100$ . Para a resistência da solda, foi utilizado o valor de 500 MPa.

### 3.3 Modelo numérico

Na Figura 5 está ilustrado o detalhe de três diferentes modelos numéricos de elementos finitos desenvolvidos: viga e coluna desenvolvidas com de elementos de casca e sem a modelagem da solda (Figura 5 a)); viga, coluna e solda desenvolvidas com de elementos de casca (Figura 5 b)); e viga e coluna desenvolvidas com de elementos de casca e a solda desenvolvida com elemento sólido (Figura 5c)). Para a avaliação e desenvolvimento do modelo numérico foram adotadas malhas de 5, 10 e 15 milímetros.

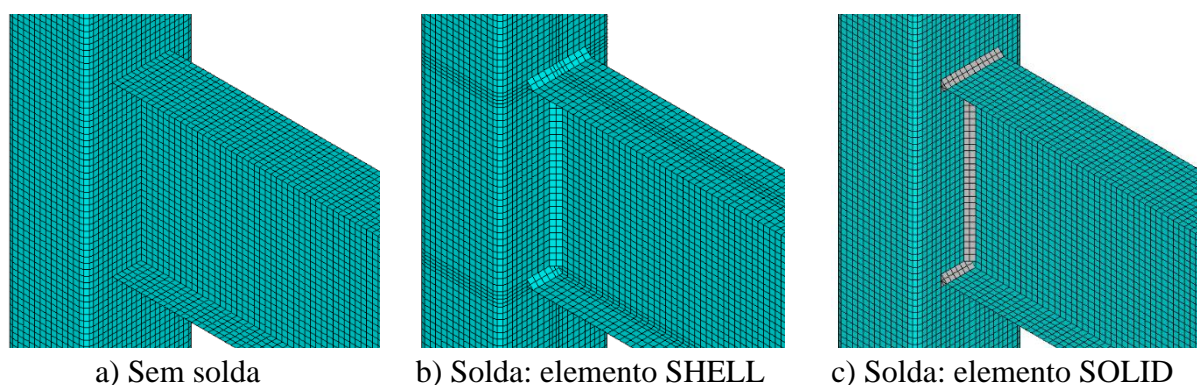


Figura 5. Detalhe dos modelos de elementos finitos desenvolvidos

Para a condição de contorno, as extremidades da coluna foram engastadas, ou seja, com translações e rotações impedidas. Na extremidade das vigas foi aplicado um deslocamento na direção paralela a face para provocar o momento fletor na ligação. A aplicação do carregamento ocorreu por meio da aplicação de incrementos de deslocamentos posicionados na extremidade da viga, considerado a uma distância de 80 cm da face. Para o método de solução foi adotado o método iterativo Newton-Raphson padrão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Influência do tipo de elemento finito

Foram desenvolvidos oito tipos de combinações entre elementos de casca e sólido (Figura 4) com as características geométricas e material descritas na Tabela 1. Na Figura 6 estão ilustrados a curva Momento-Rotação dos modelos desenvolvidos em comparação com os resultados apresentados em Barros et al. (2022 – in submission).

Não foi representado na Figura 5 o modelo numérico SHELL181 – SHELL181 devido à não convergência no processo de solução. Os demais modelos desenvolvidos com elementos SHELL 181 apresentaram dificuldade durante processo de solução, o que proporcionava um tempo de solução elevado em comparação aos outros modelos. Os modelos numéricos desenvolvidos sem a modelagem da solda apresentaram comportamento divergente em relação aos modelos



avaliados. A modelagem do elemento de solda é essencial para representar o comportamento da ligação.

Os modelos desenvolvidos com elemento finito SHELL 281 pode representar de forma satisfatória a ligação estudada. No entanto, deve ser utilizado um elemento finito para representar o cordão de solda. Na Figura 6 e na Tabela 2 estão apresentados os resultados para a rigidez e momento resistente dos modelos avaliados. Os modelos SHELL281–SOLID185 e SHELL281–SOLID186 são os que melhor representaram o comportamento da ligação. Todavia, o modelo SHELL281–SOLID185 apresentou valores de rigidez inicial e momento resistente satisfatórios em comparação aos valores apresentados por Barros et al. (2022–in submission).

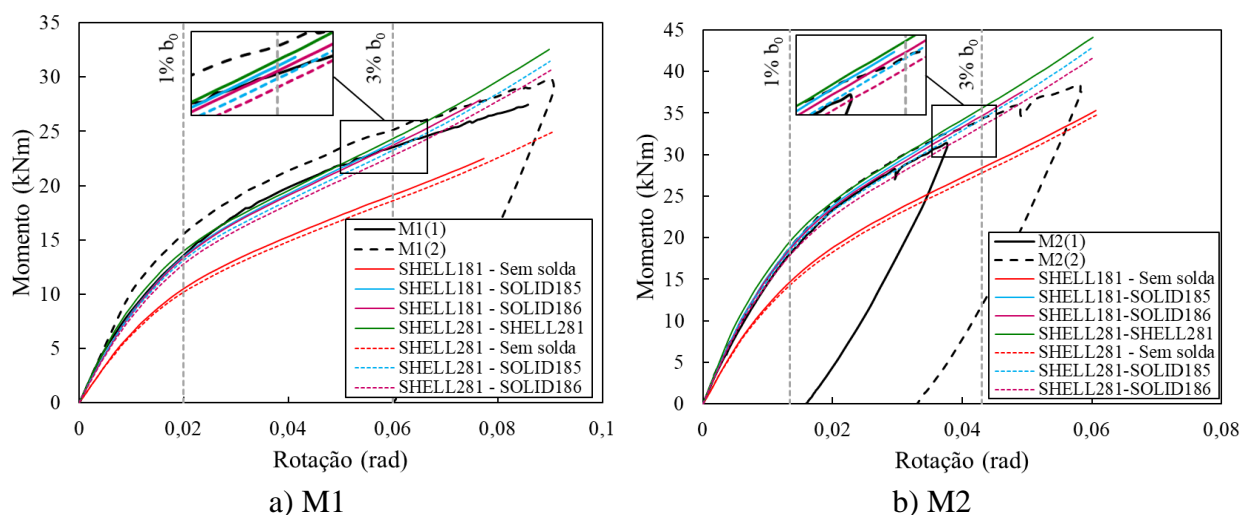


Figura 6. Influência do tipo de elemento finito

Tabela 2. Comparação dos resultados

Modelo	Elementos	$S_{j,num}$ (kNm/rad)	$M_{num}$ (kNm)	$S_{j,num}/$ $S_{j,exp(1)}$	$M_{num}/$ $M_{exp(1)}$	$S_{j,num}/$ $S_{j,exp(2)}$	$M_{num}/$ $M_{exp(2)}$
M1	SHELL181 - Sem solda	674,82	15,77	0,76	0,81	0,63	0,81
	SHELL181 - SOLID185	977,27	20,25	1,10	1,04	0,91	1,04
	SHELL181 - SOLID186	968,18	20,04	1,09	1,03	0,90	1,03
	SHELL281 - Sem solda	681,16	15,32	0,76	0,79	0,63	0,79
	SHELL281 - SHELL281	1054,55	20,97	1,18	1,08	0,98	1,08
	SHELL281 - SOLID185	884,00	19,72	0,99	1,02	0,82	1,02
	SHELL281 - SOLID186	925,10	19,19	1,04	0,99	0,86	0,99
M2	SHELL181 - Sem solda	1379,35	22,07	0,86	0,81	0,79	0,78
	SHELL181 - SOLID185	1921,34	28,35	1,19	1,05	1,10	1,00
	SHELL181 - SOLID186	1905,93	28,02	1,19	1,03	1,09	0,99
	SHELL281 - Sem solda	1390,04	21,51	0,86	0,79	0,80	0,76
	SHELL281 - SHELL281	2058,89	29,37	1,28	1,08	1,18	1,04
	SHELL281 - SOLID185	1774,00	27,74	1,10	1,02	1,02	0,98
	SHELL281 - SOLID186	1857,11	26,89	1,15	0,99	1,07	0,95



#### 4.2 Influência do tamanho da malha

A malha de elementos finitos foi definida de forma mapeada com a finalidade de proporcionar elementos equidistantes e visando diminuir a concentração de tensões na região da ligação. Além disso, a quantidade e a tipologia dos elementos finitos podem interferir diretamente no resultado dos modelos.

Assim, foi realizado um estudo da influência do tamanho das malhas de elementos finitos no comportamento Momento-Rotação da ligação. Foram avaliadas as malhas com dimensões igual a 5, 10 e 15 mm, sendo a primeira mais refinada e a última pouco refinada, respectivamente.

Na Figura 7 está representado a curva Momento-Rotação do modelo numérico M1 com a viga e coluna com elemento SHELL 281 e a solda SOLID 185. Notou-se uma similaridade das curvas e uma uniformização do comportamento à medida que o comprimento das malhas é aumentado. Para os resultados para  $M_{1\%}$  e  $M_{3\%}$  observou-se que a diferença entre os modelos de com tamanho do elemento de 10mm e 15mm não foi significativa. Assim, ambos tamanhos de malha podem ser escolhidos para serem para futuras análises paramétricas. A malha com tamanho de 5 mm apesar de proporcionar um maior refinamento na malha e maior número de elementos apresentou um elevado tempo de processamento.

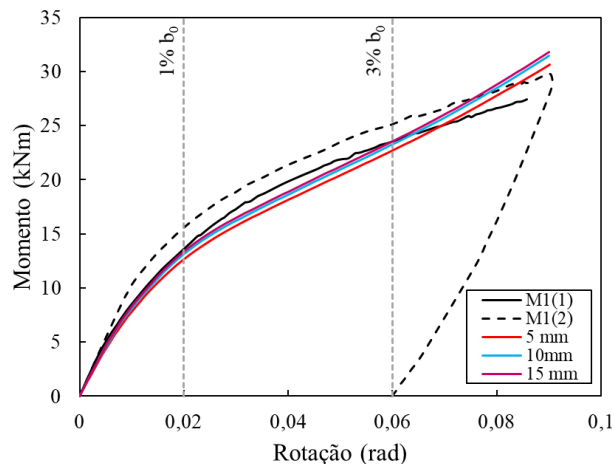


Figura 7. Influência do tamanho da malha na curva Momento-Rotação para modelo M1 (SHELL281 – SOLID185)

#### 4.3 Modo de falha e distribuição de tensões

Em todos os modelos numéricos avaliados o modo de falha de plastificação da parede frontal foi observado, como esperado em ligações do tipo T cujo parâmetro  $\beta$  inferior ou igual a 0,85. Na Figura 8 é apresentada a evolução das tensões de von Mises para valores próximos de  $M_{1\%}$  e  $M_{3\%}$  do modelo M1. Observou-se que para valores de  $M_{1\%}$  o escoamento foi atingido na parede frontal em regiões próximas as mesas da viga, Figura 8 a). Para valores de  $M_{3\%}$  as tensões de von Mises são superiores a tensão de escoamento em toda a face frontal e em regiões da parede lateral, Figura 8 b).

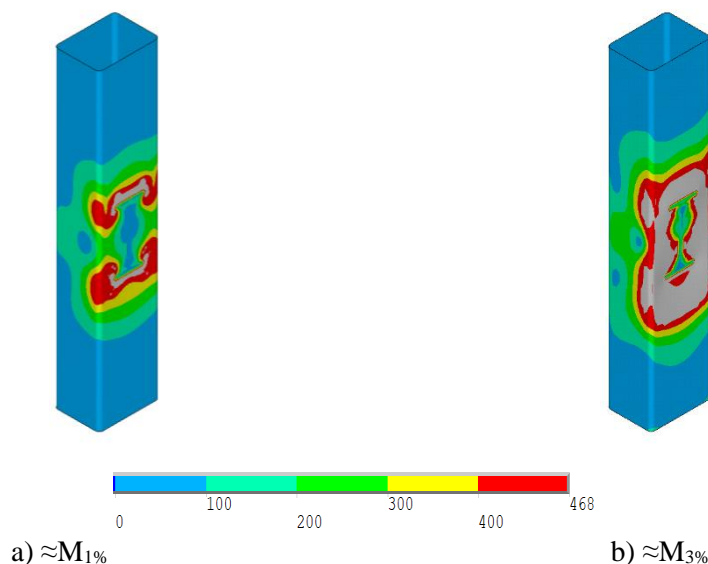


Figura 8. Distribuição das tensões de von Mises [MPa] do modelo M1 (SHELL281 - SOLID185)

## 5. CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo numérico de ligações do tipo T formadas por coluna tubulares retangulares e vigas de seção I sob momento fletor. Diferentes modelos numéricos foram desenvolvidos e realizada a análise via elementos finitos do comportamento da ligação para determinação do elemento finito, tamanho de malha ideal e modelagem do cordão de solda.

Observou-se que os modelos com elemento finito de casca SHELL 181 apresentaram dificuldade durante processo de solução. Os modelos com elemento finito de casca SHELL 281 apresentaram os melhores resultados comparados com resultados anteriores. No entanto, em modelos em que foi utilizado o elemento finito sólido para representar a solda. Os modelos numéricos sem a modelagem da solda não apresentaram resultados satisfatórios.

Uma comparação dos resultados provenientes da análise numérica com resultados anteriores foi realizada. Verificou-se que o modelo com a coluna e a viga de elementos de casca SHELL 281 e a solda com elemento sólido SOLID 185 e tamanhos dos elementos iguais de 10 e 15 milímetros podem representar o comportamento da ligação. Além disso, observou-se a ocorrência de falha por plastificação da face frontal da coluna junto a coluna, assim como esperado para ligações do tipo T cujo parâmetro  $\beta$  é menor ou igual a 0,85.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).





## REFERÊNCIAS

- Barros HTG de (2021) *Análise Numérica de Ligações Soldadas Entre Pilar de Seção RHS e Viga de Seção 'T'*. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- Barros HTG de, Oliveira MM de, Sarmanho AMC, et al. (2022 in submission) Stiffness assessment of welded I-beam to RHS column connections. *Engineering Structures*.
- López-Colina C, Serrano MA, Lozano M, et al. (2019) Characterization of the main component of equal width welded I-beam-to-RHS-column connections. *Steel and Composite Structures* 32(3): 337–346. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2019.32.3.337>.
- Lu LH (1997) *The Static Strength of I-Beam to Rectangular Hollow Section Column Connections*. Ph.D. Thesis. Delft, The Netherlands: Technische Universiteit Delft.
- Lu LH, De Winkel GD, Yu Y, et al. (1994) Deformation limit for the strength of hollow section joints. *Tubular Structures VI*: 341–347.
- Málaga-Chuquitaype C and Elghazouli AY (2010) Component-based mechanical models for blind-bolted angle connections. *Engineering Structures* 32(10): 3048–3067. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.05.024.
- Matos RMMP de, Costa-Neves LF, Lima LRO de, et al. (2015) Resistance and elastic stiffness of RHS 'T' joints: part I - axial brace loading. *Latin American Journal of Solids and Structures* 12(11): 2159–2179. DOI: 10.1590/1679-78251790.
- Nunes TC (2012) *Análise de Ligações Metálicas Soldadas Entre Pilar de Seção RHS e Viga de Seção I*. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- Pereira DJR, Sarmanho AMC, Nunes GV, et al. (2019) Effect of fillet welds on T-joints with thin-walled chords. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 172(4): 301–312. DOI: 10.1680/jstbu.18.00043.
- Serrano-López MA, López-Colina C, González J, et al. (2016) A simplified FE simulation of welded I beam-to-RHS column joints. *International Journal of Steel Structures* 16(4): 1095–1105. DOI: 10.1007/s13296-016-0028-5.
- Serrano-López MA, López-Colina C, Wang YC, et al. (2019) Comparative behaviour of 'I beam-RHS column' joints with and without web weld. *Journal of Constructional Steel Research* 159: 330–340. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.002.
- Serrano-López MA, López-Colina C, Wang YC, et al. (2021) An experimental study of I beam-RHS column demountable joints with welded studs. *Journal of Constructional Steel Research* 182: 106651. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106651.
- Wardenier J, Packer JA, Zhao X-L, et al. (2010) *Hollow Sections in Structural Applications*. 2nd ed. Geneva: CIDECT.