

Análise Teórico-Experimental de Ligações Soldadas entre Pilares de Perfis de Seção Circular e Vigas de Perfis I

Sylvia L. F. Reis¹, Arlene M. S. Freitas^{2*}, Geraldo D. de Paula³ Marcílio S. R. Freitas⁴

¹ Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PROPEC-DECIV/EM/UFOP, sylvialetizia@ig.com.br

² Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil - PROPEC-DECIV/EM/UFOP, arlene@em.ufop.br

³ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil - PROPEC-DECIV/EM/UFOP, geraldo@em.ufop.br

⁴ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil - PROPEC-DECIV/EM/UFOP, marcilio@em.ufop.br

Theoretical Experimental Analysis of Welded Joints with Circular Hollow Section Columns and I Beams

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo de ligações soldadas formadas por pilar tubular sem costura de seção transversal circular e viga de aço de seção transversal tipo "I". Para este estudo foram desenvolvidas análise experimental e teórica das ligações. Os ensaios experimentais foram realizados com protótipos em escala real, com a geometria definida através de estudos de esbeltez, resistência e rigidez. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os ensaios da ligação visaram a obtenção do comportamento momento-rotação, carga última e modo de colapso da ligação e a comparação destes com modelos teóricos, o que permitiu a classificação da ligação quanto à sua rigidez. As análises teóricas foram realizadas a partir das prescrições de norma. As ligações ensaiadas apresentaram como modo de falha a plastificação da face do pilar.

Palavras-chave: estruturas tubulares, ligações, testes experimentais

Abstract

This work presents a study of welded joints, formed by a structural steel hot rolled hollow section, having circular hollow sections at the columns and steel "I" sections at the beam. The study developed theoretical analyses for the joints and experimental tests in full scale prototypes. The experimental tests on the joints were performed at the Structures Laboratory of the Civil Engineering Department in the School of Mines, at the Universidade Federal de Ouro Preto. The results for behavior, ultimate load, stiffness, and collapse mode were analyzed and compared with theoretical models. The theoretical analysis was carried out from the codes prescriptions. The model represents the behavior and load capacity and the stiffness of the tested joints. The joints tested indicated the plastic failure of the column face.

Keywords: tubular structures, joints, experimental tests

1 Introdução

No Brasil tem-se intensificado o uso de elementos estruturais metálicos associados a diversos fatores como, por exemplo, a rapidez de execução. Dentre esses elementos estruturais, a sua forma, sua tipologia e seção estão associadas ao tipo de aplicação, estética, condições de uso, etc. Dentre as várias tipologias que envolvem a fabricação e forma das seções transversais dos perfis estruturais, encontram-se os perfis tubulares, que são largamente utilizados em diversos países.

Entretanto, para as ligações entre pilar tubular de seção circular (CHS - Circular Hollow Section) e viga de seção tipo I que é objeto de estudo deste trabalho (comuns em edifícios de andares múltiplos), existem poucas contribuições em pesquisas, principalmente no Brasil. Os perfis tubulares geralmente são aplicados em elementos estruturais, como pilares, treliças planas, espaciais, etc. No Brasil, são muitos os exemplos em estruturas tubulares em aço, conforme apresentado na Figura 1.



a) Estádio João Havelange “Engenhão”, Rio de Janeiro. Fonte: Disponível em

<[65TTP://diariodorio.com/fotos-do-engenhao-a-noite](http://diariodorio.com/fotos-do-engenhao-a-noite)>. Acesso

em: 20 abr. 2010.

b) Prédio da Escola de Farmácia, UFOP. Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 1. Exemplos de estruturas com perfis tubulares em aço no Brasil.

Sendo assim, neste trabalho é feita uma avaliação teórico-experimental de ligação soldada utilizando um pilar de perfil tubular circular de aço e uma viga em perfil I. Foi feito um estudo entre as relações entre diâmetro e espessura do tubo, e o comprimento da mesa da viga de perfil I que influenciam diretamente na transmissibilidade do momento e na rigidez da ligação (Reis, 2011). Faz-se também uma análise do comportamento momento versus rotação ($M-\phi$) das ligações e a avaliação das prescrições existentes nas normas de dimensionamento.

2 Rigidez das Ligações

Os estudos e observações realizados atualmente, com base no comportamento estrutural de ligações entre elementos de estruturas metálicas, vêm comprovar a necessidade de se considerar a resposta não linear das estruturas e das ligações na análise estrutural.

O comportamento semirrígido das ligações é considerado pelas especificações mais recentes, uma vez que para o aperfeiçoamento dos métodos mais tradicionais eram considerados apenas comportamentos idealizados da ligação, como no caso das ligações flexíveis e rígidas.

Os estudos sobre o comportamento das ligações procuram considerar as características que possam classificá-las em termos de rigidez, resistência e ductilidade. Esses sistemas de classificação são concebidos de forma a permitir a inclusão e a consideração de novos tipos de comportamentos de ligações, idealizados ou não.

O conhecimento do comportamento estrutural da ligação vem pela determinação da relação momento-rotação ($M-\phi$), que fornece os parâmetros necessários para sua classificação assim como a análise da estrutura na qual a ligação está inserida, considerando-se seu comportamento não linear.

De forma geral, o diagrama $M-\phi$ pode ser determinado de várias maneiras tais como simulações numéricas, modelos teóricos, modelos semiempíricos ou ensaios experimentais. O Eurocode 3 - part 1-8 de 2005 estabelece os limites de rigidez que classificam a ligação a partir do diagrama $M-\phi$ e tais limites são mostrados na Figura 3.

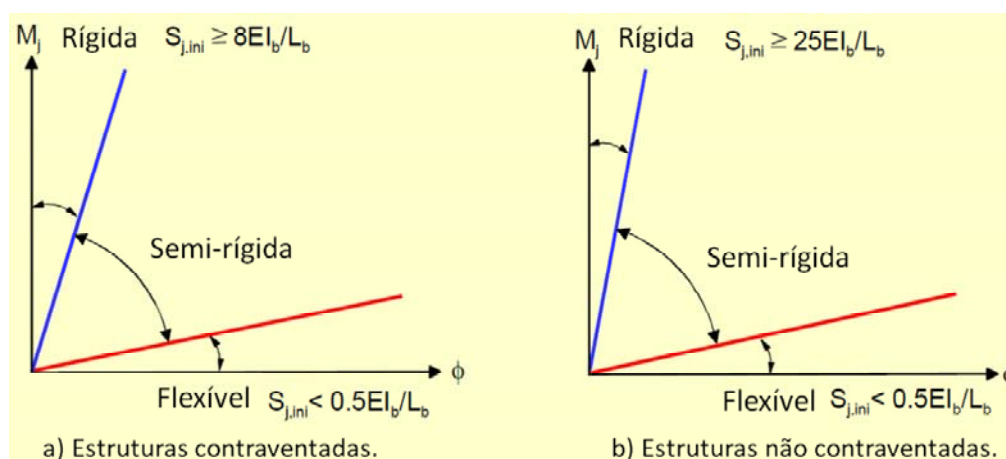


Figura 3. Limites para classificação da rigidez de ligação viga-pilar conforme o Eurocódigo 3 (EN 1993 – 1 – 8).

3 Prescrições Existentes

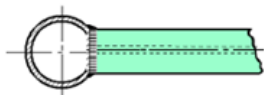
As primeiras pesquisas de ligações não-enrijecidas entre chapas ou vigas tipo I e perfis CHS ocorreram no Japão (Kurobane, 1981) e posteriormente por Wardenier (1982), apud Makino (1984), Kamba e Taclendo (1998) e finalmente, por Aryioshi e Makino (2000).

Na década de noventa, um extensivo programa foi realizado por Winkel (1998) para investigar o comportamento de ligações não enrijecidas multiplanar e uniplanar entre vigas de seção transversal I ou H e pilares CHS.

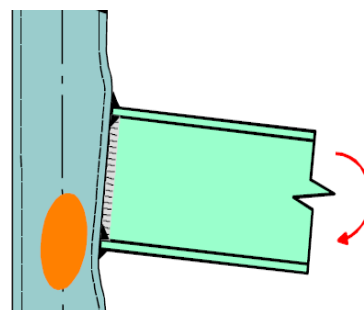
As formulações de dimensionamento são definidas baseando-se em como a estrutura irá comportar-se e quais serão os estados-limites últimos que poderão ocasionar a ruptura da ligação.

O comportamento de cada ligação durante o colapso é função da distribuição de tensão na região da ligação, o que é dependente das características geométricas dos elementos ligados. Para o dimensionamento dessas ligações, diversos estados-limites últimos devem ser observados, a saber:

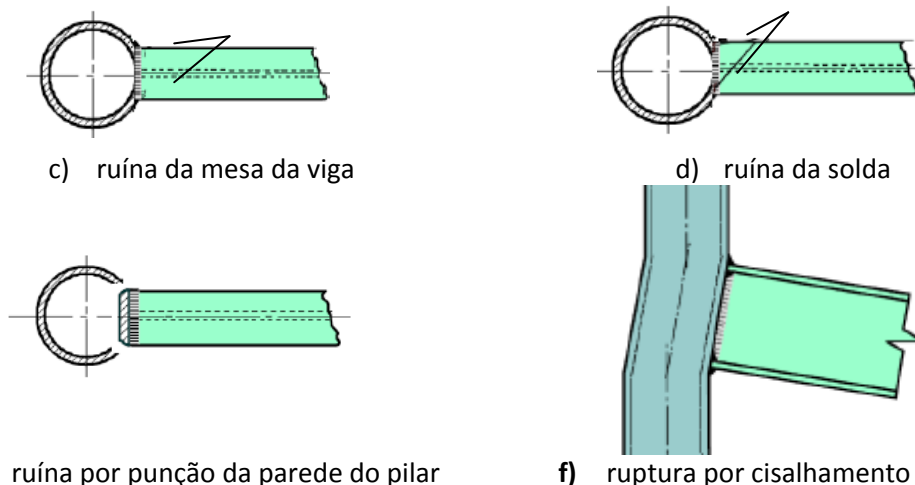
- ruína plástica da face do pilar, Figura 4 (a);
- flambagem local da parede do pilar, Figura 4 (b);
- ruína da mesa da viga, Figura 4 (c);
- ruína da solda, Figura 4 (d);
- ruína por punção da parede do pilar, Figura 4 (e);
- ruína por cisalhamento do pilar, Figura 4 (f);



a) plastificação da face do pilar



b) flambagem local da parede do pilar




c) ruína da mesa da viga d) ruína da solda
e) ruína por punção da parede do pilar f) ruptura por cisalhamento no pilar
Figura 4. Modos de ruína para ligações soldadas entre viga tipo I e pilar CHS. Fonte: Wardenier *et al.*(2010) adaptado.

As recomendações normativas do CIDECT (Wardenier et al, 2010) foram baseadas em estudos feitos por Kurobane (1981), Wardenier (1982) e posteriormente por apud Makino et al (2000), que foram adotadas pelo Eurocode 3 part 1-8 de 2005 (Tabela 1).

A plastificação da ligação soldada entre viga I e pilar CHS não é determinada só pela ligação entre as mesas da viga, mas também pela espessura do pilar. Deve-se ressaltar que o efeito da alma não é considerado para a resistência da ligação nas equações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações de resistência de cálculo de ligação soldada entre viga tipo I e pilar CHS (CIDECT E EUROCODE 3).

Tipo de ligação T	Estado Limite de Projeto
	Plastificação da face do pilar $N_{1,Rd} = f_{y0} t_0^2 (4 + 20 \beta^2) (1 + 0,25 \eta) f(n')$ (1)

	$M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd}$ (2)
	$M_{op,1,Rd} = 0,5b_1 f_{y0} t_o^2 \frac{5}{1 - 0,81\beta} (1 + 0,25\eta)f(n')$ (3)
Fator redutor do efeito de compressão no pilar	
	$f(n') = 1 + 0,3n' - 0,3(n')^2$ para $n' \leq 1,0$ quando o pilar estiver comprimido; (4)
	$f(n') = 1$ para $n' > 1,0$ quando o pilar estiver tracionado; (5)
	$n' = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}}$ (6)
Faixa de validade	
$\theta_1 = 90^\circ$ $d_0/t_0 \leq 40$ vigas: classe 2	
<p>Onde:</p> <p>$N_{1,Rd}$ = força normal resistente de cálculo;</p> <p>$M_{ip,1,Rd}$ = momento fletor resistente de cálculo no plano da ligação;</p> <p>$M_{op,1,Rd}$ = momento fletor resistente de cálculo fora do plano da ligação;</p> <p>$\sigma_{p,Ed}$ = tensão axial solicitante no pilar;</p> <p>f_{y0} = tensão de escoamento do aço do pilar;</p> <p>$\beta = b_1/d_0$;</p> <p>$\eta = h_1/d_0$;</p>	

Segundo o CIDECT Design Guide Nº 9 (kurobane et al, 2004) *apud* Aryioshi e Makino (2000), as recomendações para a rigidez axial da ligação são dadas de forma simplificada pela Equação (7) que considera a ligação T como de uma chapa:

$$K = 1,9Et_c\beta^{1,3}(2\gamma)^{-0,7} \quad (7)$$

onde

K = rigidez axial da mesa.

E = módulo de elasticidade do aço;

t_0 = espessura do pilar tubular circular;

β = relação entre a largura da mesa da viga ligada ao pilar e o diâmetro do pilar tubular circular;

γ = relação entre o diâmetro do tubo e o dobro da sua espessura.

Para o comportamento momento-rotação as seguintes equações são aplicadas:

$$M_{ip} = N_{1,Rd}(h_1 - t_{b,f}) = C_{b,ip}\phi = C_{b,ip} \frac{2\delta}{(h_1 - t_{b,f})} \quad (8)$$

$$C_{b,ip} = 0,5K(h_1 - t_{b,f})^2 \quad (9)$$

onde,

M_{ip} = momento fletor no plano da ligação;

$N_{1,Rd}$ = força normal resistente de cálculo;

N = carregamento axial;
 h_1 = altura da viga;
 $t_{b,f}$ = espessura da mesa da viga;
 $C_{b,ip}$ = rigidez da ligação;
 ϕ = rotação da ligação;
 δ = deslocamento da viga.

Multiplicando-se a rigidez axial K da mesa da viga conectada por $0,5(h_1-t_{b,f})^2$ tem-se uma aproximação da rigidez dada pela Equação (9), para as ligações capazes de transmitir momento fletor. Entretanto, ressalta-se que a contribuição da alma da viga conectada é desprezada.

4 Programa Experimental

Os ensaios realizados são de ligações soldadas entre pilares de perfis tubulares circulares sem costura, laminados a quente, fabricados pela Vallourec & Mannesmann Tubes do Brasil e vigas de aço laminadas a quente com seção transversal tipo I de abas paralelas fabricadas pela Gerdau Açominas. Foram realizados um total de quatro ensaios, sendo dois de cada protótipo. Os protótipos ensaiados e os perfis que os compõem são mostrados na Tabela 2, a seguir.

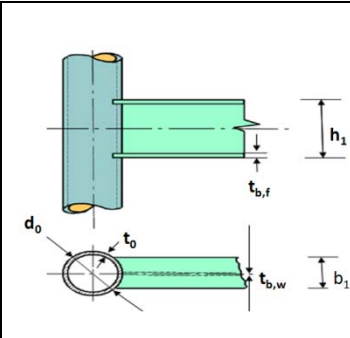
Tabela 2-Definição dos perfis em aço dos protótipos ensaiados.

Protótipo	Pilar $\phi \times t_o$ (mm)	Viga
P1	219,1 x 9,5	310 x 38,7
P2	219,1 x 8,2	250 x 17,9
ϕ = diâmetro do tubo; t_o = espessura do tubo.		

Foi avaliada a resistência última das ligações e durante os ensaios foram observados os mecanismos de colapso, os deslocamentos e deformações, sendo os níveis de carregamento baseados em modelagens numéricas (Reis *et al.*, 2011). As condições de contorno, onde foram engastadas as extremidades do pilar, e as aplicações dos carregamentos foram feitas de maneira a simular uma ligação soldada real. As dimensões nominais dos perfis utilizados na composição dos protótipos ensaiados estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões nominais dos perfis utilizados na composição dos protótipos.

Pilar		Viga				
d_0 (mm)	t_0 (mm)	Perfil	h_1 (mm)	b_1 (mm)	$t_{b,f}$ (mm)	t_w (mm)
219,1	9,5	W310x38,7	310	165	9,7	5,8
219,1	8,2	W250x17,9	251	101	5,3	4,8



Na Tabela 4 tem-se as propriedades mecânicas dos perfis circulares de aço utilizados.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço dos perfis dos pilares dos protótipos.

Perfis $\phi \times t_0$ (mm)	Resistência ao Escoamento f_y (MPa)	Resistência à Ruptura f_u (MPa)	Alongamento (%)
219,1 x 8,2	385	582	33
219,1 x 9,5	374	571	34

Para as vigas foram utilizados perfis laminados de aço da empresa Gerdau Açominas onde foram considerados os valores nominais de 345 MPa para a resistência ao escoamento e 485 MPa para a resistência à ruptura.

4.1 Montagem e instrumentação dos ensaios

O sistema de aplicação de carga foi instalado em um pórtico de reação, com carregamento aplicado por meio de um atuador hidráulico, sendo o valor do carregamento medido por uma célula de carga, em cuja extremidade foi colocada uma rótula de carga visando manter a verticalidade do carregamento. A Figura 5 a seguir, mostra o sistema de aplicação de carga.

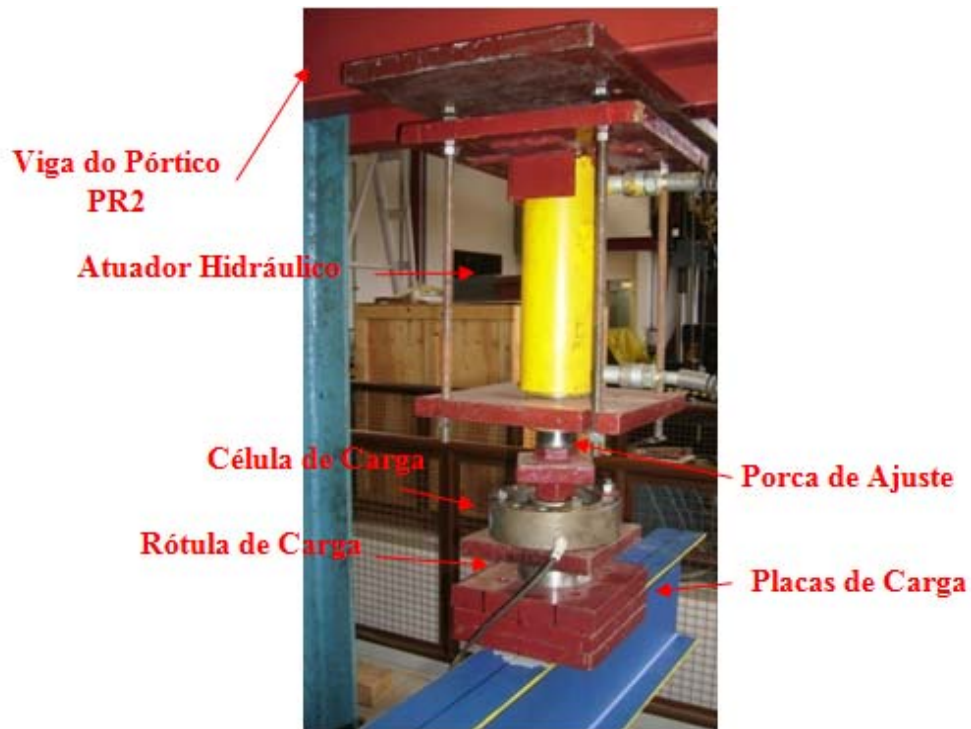


Figura 5 - Sistema de aplicação de cargas.

A instrumentação usada no ensaio experimental visou ao monitoramento de deformações e deslocamentos assim como o controle dos carregamentos aplicados. A leitura de deslocamentos ocorridos na viga durante o ensaio, flecha da viga, foi feita por meio de LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers), em que as leituras dos deslocamentos são medidas e armazenadas por meio de sistema de aquisição de dados controlado por computador. Utilizou-se os deflectômetros de haste, que foram posicionados no pilar para a monitoração eventual de deslocamento.

Os LVDT's foram posicionados abaixo da viga no total de três em cada ensaio (L1, L2 e L3), sendo o L3 a 29 cm da face do pilar, o L2 e o L1 a uma distância de 29 cm entre eles, sendo que o L1 ficou posicionado abaixo do sistema de aplicação de carga, Figura 6.

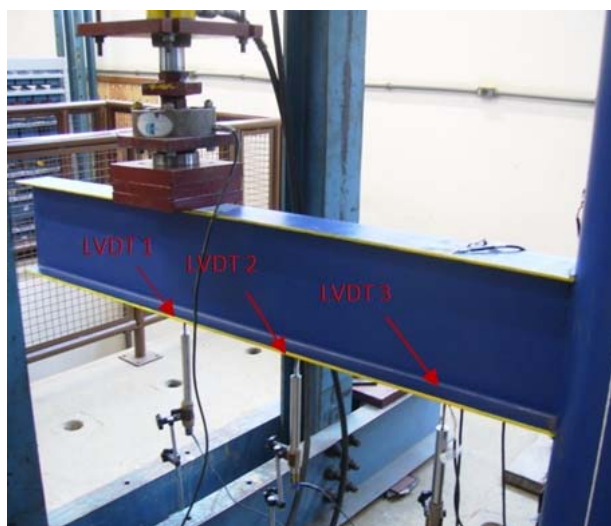
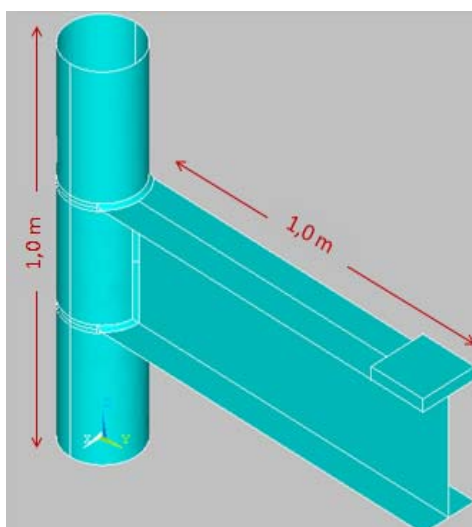
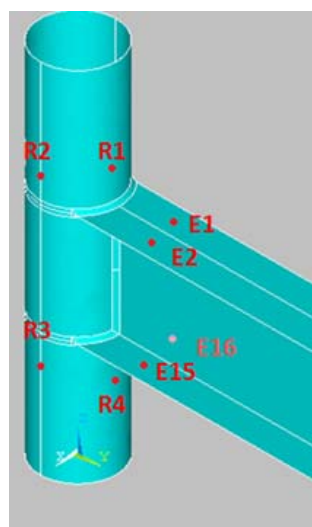


Figura 6 - Posicionamento dos LVDT's instalados no protótipo.

Para medição das deformações foram utilizados os extensômetros elétricos de resistência unidirecionais e também do tipo roseta 45°. Nas ligações ensaiadas, foram coladas rosetas na face do pilar e extensômetros nas mesas da viga, como pode ser observado na Figura 7.



a) Dimensões do protótipo.



b) Extensômetros tipo Rosetas de 90° (R1, R2, R3 e R4) e extensômetros uniaxiais (E1, E2, E15 e E16).

Figura 7 - Posicionamento dos extensômetros e rosetas nos protótipos.

Para aquisição dos dados foi utilizado um sistema automático controlado por computador dotado de um sistema de controle e monitoramento de aquisição. Os ensaios foram realizados com uma pré-carga para ajuste e verificação dos equipamentos. Em seguida foi aplicado o carregamento, sendo o critério de parada do ensaio a identificação do mecanismo de falha e a perda de resistência da ligação.

4.2 Apresentação dos Resultados Experimentais

Para cada etapa de carga de cada ensaio do protótipo, foram medidas as deformações e os deslocamentos, e a partir desses resultados foi possível determinar a curva momento-rotação e a rigidez da ligação dos protótipos em questão.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que o modo de falha preponderante foi a “plastificação da face do pilar” com o escoamento inicial na roseta 4, como pode ser visto nas Figuras 8 e 9 como os representativos da série, indicados a partir da carga x deformação específicas obtidas.

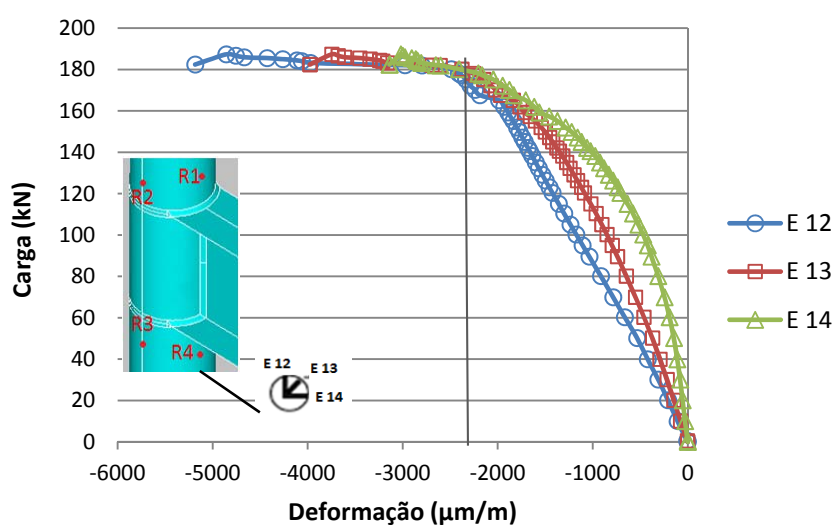


Figura 8- Carga x Deformação específica para a roseta R 4 do protótipo P1.

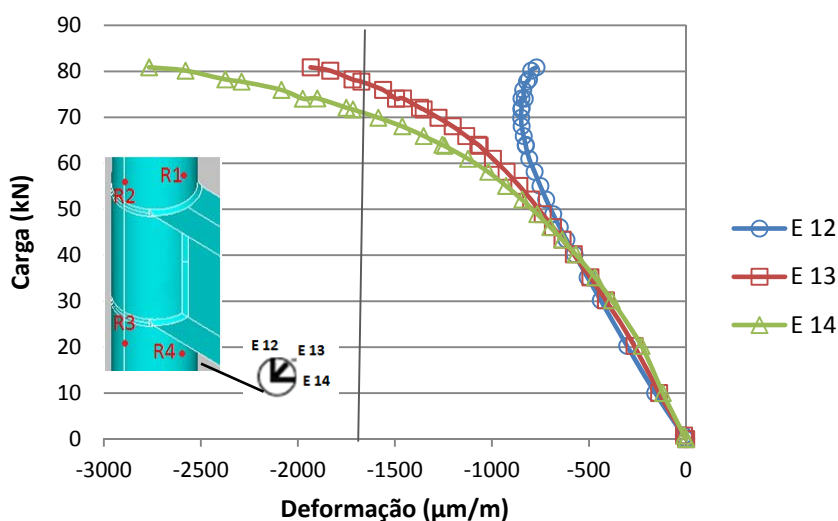


Figura 9 -Carga x Deformação específica para a roseta R 4 do protótipo P2.

Para se obter a curva momento-rotação da ligação em estudo, calculou-se o momento fletor para cada carga aplicada considerando que o braço é a distância da aplicação de carga até a face do pilar. A rotação obtida é a rotação da ligação. Os valores máximos de momento fletor e de rotação para esse ensaio foram respectivamente de 143,66 kNm e 0,074 rad, como mostra a Figura 10. Para o cálculo da rigidez foi utilizado o Método da Inclinação Inicial (Reis, 2011), chegando a uma rigidez igual a 9004,27 kNm/rad.

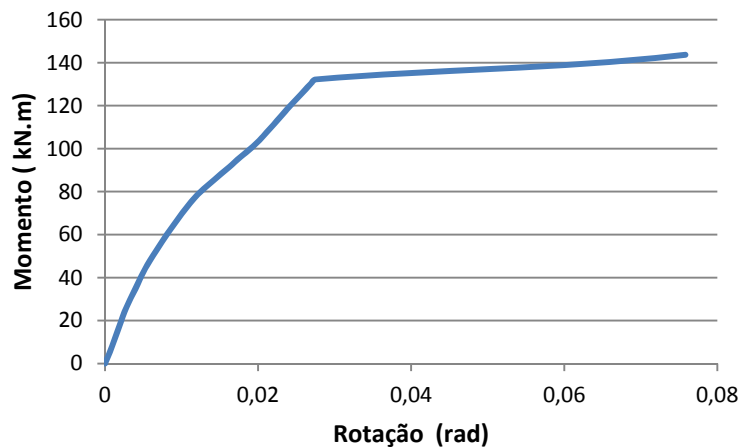


Figura 10 -Curva Momento-Rotação da ligação para o protótipo P1.

Para o ensaio P2 pôde-se determinar os valores máximos de momento fletor e de rotação que foram respectivamente de 72,52 kNm e 0,058 rad. A Figura 11 mostra a curva momento-rotação do ensaio P2 através da qual foi obtida um valor da rigidez da ligação igual a 4759,71 kNm/rad.

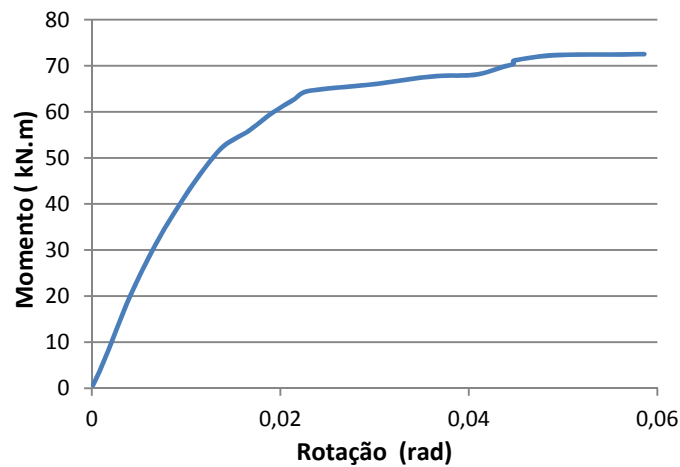


Figura 11 - Curva Momento-Rotação da ligação do protótipo P2.

A Figura 12 a seguir mostra o esmagamento da face do pilar pela viga, onde se percebe um enrugamento da mesa inferior da viga.



Figura 12 - Esmagamento do pilar pela mesa da viga por forças de compressão.

Na Tabela 5 a seguir têm-se os resultados obtidos nos ensaios, onde P_y corresponde à carga aplicada que ocasionou a plastificação do aço do pilar, P_{max} é a carga máxima aplicada nos ensaios. Nessa tabela é indicado também o momento fletor máximo obtido nos ensaios, a rotação máxima e a rigidez da ligação obtida experimentalmente.

Tabela 5 - Resultados obtidos nos ensaios experimentais.

Protótipo	Cargas Experimentais (kN)		Momento Fletor Máximo (kNm)	Rotação Máxima (rad)	Rigidez (kNm/rad)
	P_y	P_{max}			
P1	135,08	186,69	162,42	0,074	9004,27
P2	71,73	83,35	72,51	0,058	4759,71

5 Análise e Comparação dos Resultados

A exposição e discussão dos resultados é feita de modo a se estabelecer um comparativo entre os resultados teóricos e experimentais obtidos a partir do Eurocode 3 part 1-8 de 2005 e CIDECT (Kurobane et al, 2004). A Tabela 6 a seguir, mostra a comparação entre esses resultados, onde se pode observar que houve uma boa correlação entre os valores da rigidez experimental e teórica principalmente para os ensaios do protótipo P1. Todas as ligações são classificadas como semirrígidas de acordo com os limites de rigidez do Eurocode 3.

Tabela 6 - Comparação entre os resultados teóricos e experimentais.

Ensaio	Teórico		Experimental	
	$M_{ip,1,Rd}$ (kN.m) (Eq. (2))	Rigidez (kN.m/rad) (Eq. (9))	$M_{max.}$ (kN.m)	Rigidez (kN.m/rad)
P1	160,54	8089,23	143,66	9004,27
P2	53,60	2227,66	72,52	4759,71

6 Considerações Finais

A determinação da rigidez inicial das ligações é influenciada pelas características elásticas dos materiais pelas características geométricas e pela tipologia do carregamento.

No entanto, as representações do desenvolvimento de deformações plásticas, redistribuições de tensões e colapso, dependem dos modelos constitutivos dos materiais.

A ligação apresentou deformações plásticas na face do pilar principalmente na região comprimida, que recebe as forças oriundas da viga, definindo como modo de colapso a plastificação do pilar.

Os resultados experimentais obtidos proporcionaram a determinação da rigidez da ligação, distribuição de tensões na região do pilar e da viga, o mecanismo de colapso desenvolvido e a carga última aplicada.

Neste trabalho procurou-se o avanço do conhecimento do comportamento da ligação soldada entre viga de seção tipo I e pilar de perfil tubular circular em aço, evidenciando-se a necessidade de se conhecer e explorar o conceito de semirrigidez das ligações tubulares em aço, propondo formulações capazes de prever sua rigidez e desenvolvendo aplicações.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa), FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil.

8 Referências bibliográficas

Eurocode 3, ENV 1993-1-8, 2005: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

Eurocode 3, ENV 1993-1-8, 2005: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

Kurobane, Y., 1981: New developments and practices in tubular joint design (+ addendum) International Institute of Welding Commission XV, IIW Doc. XV-488-81.

Wardenier, J., Packer, J.A, Zhao, X.-L and Vegte, G. J. van der, 2010: Hollow Sections in Structural Applications. 2nd Edition, CIDECT, Geneva, Switzerland. ISBN 978-90-73830-86-9.

Wardenier, J., 1982: Hollow section connections. Delft University Press, Delft Netherlands.

Makino, Y., 1984: Experimental study on ultimate capacity and deformation for tubular joints. Ph.D. Thesis, Osaka University, Osaka, Japan. (in Japanese).

Kamba, T and Taclendo, C., 1998: CHS column connections without stiffener. Proc. 8th Int. Symposium on Tubular Structures, Singapore, pp. 567-576.

Aryioishi, M and Makino, Y., 2000: Load-deformation for gusset-plate to CHS tube joints under compression loads. Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 10, Nº 4, pp 292-300.

Kurobane, Y., Packer, J.A., Wardenier, J., & Yeomans, N., 2004: Design guide for structural hollow section column connections. CIDECT Series "Construction with hollow steel sections" No. 9, TÜV-Verlag, Köln, Germany, ISBN 3-8249-0802-6.

Wardenier, J., Packer, J.A, Zhao, X.-L and Vegte, G. J. van der, 2010: Hollow Sections in Structural Applications. 2nd Edition, CIDECT, Geneva, Switzerland. ISBN 978-90-73830-86-9.

Reis, S.L.F.; de Paula, G.D.; Araújo, A.H.M.; Freitas, A.M.S.: Theoretical Analysis of Tubular and "I" Connections. In: XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, San Juan, Argentina, 2010.

Reis, S.L.F.(2011). Análise Teórico-Experimental de Ligações Metálicas Soldadas entre coluna em Perfil Tubular Circular e Viga em Perfil de Seção Transversal "I". Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

Reis, S.L.F.; Freitas, A.M.S.; de Paula, G.D.; Lima, L. R. O.: Avaliação Numérica de Ligações Tubulares Soldadas entre Perfis Circulares e Vigas I. In: Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2011, Coimbra, Portugal. Anais APMTAC, Portugal, 2011.