



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO TUBO NAS LIGAÇÕES SOLDADAS ENTRE VIGAS DE SEÇÃO "I" E PILARES EM PERFIS TUBULARES

Jefferson de Andrade Rodrigues

Juliano Geraldo Ribeiro Neto

jeffersonandrade7@hotmail.com

julianogeraldopuc@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO

Rua 235, 76 - Setor Leste Universitário, 74605-050, Goiânia, Goiás, Brasil

Gabriel Vieira Nunes

gvnunes@yahoo.com.br

Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG-Câmpus Congonha

Av. Michel Pereira de Souza, 3007, Campinho, 36415-000 – Congonhas, Minas Gerais, Brasil

Resumo. A evolução constante da construção metálica propicia a introdução de novas tecnologias como associação de colunas em perfis tubulares e vigas em perfil I. Apesar do crescimento e disseminação do uso das estruturas tubulares no Brasil, ainda há uma carência em pesquisas que forneçam ferramentas capazes de prever o comportamento desses elementos estruturais. Sendo assim, torna-se necessário a realização de estudos e pesquisas para posteriores inclusões em normas de mecanismos de cálculo. Este trabalho visa analisar a influência da espessura do tubo no comportamento semi-rígido da ligação soldada entre viga I e pilar de seção tubular retangular (RHS) através da modelagem numérica no software ANSYS® 12.0 e através de análises teóricas, obtendo assim a curva do Momento x Rotação Relativa ($Mx\Phi$) e a classificação da ligação quanto à capacidade de rotação apresentada. Foram analisados nove modelos considerando: três seções de vigas para uma largura de pilar, com três espessuras diferentes. Dos resultados foi verificado a grande influência da espessura do pilar no comportamento da ligação, sendo decisivo para a classificação da sua semi-rigidez. Através de uma análise de regressão linear foi possível obter uma equação para predição dos valores da semi-rigidez, com base nos parâmetros geométricos da ligação.

Palavras-chave: Ligações, Semi-rigidez, Método dos elementos finitos, Análise numérica, Perfil tubular.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas tubulares, podendo exercer a função de pilar, viga, estrutura de cobertura e compor fachadas, pontes, passarelas, barreiras de contenção e estruturas off-shore, possuem grandes vantagens como alta resistência a torção, cargas axiais e aos efeitos combinados, reduzida área de pintura contra ataques corrosivos e incêndios, rapidez de execução, além de permitir obras com soluções arrojadas, modernas e econômicas, todas elas contribuindo para diminuir o valor do orçamento final da obra (Affonso, 2014).

Conhecer os tipos de ligação é extremamente importante na elaboração do projeto, visto que interferem significativamente na estética, resistência e funcionalidade da estrutura. Além disso, Affonso (2014) ressalta que a resistência das ligações entre os elementos representa o ponto crítico em um projeto de estruturas tubulares. Diferentes tipos de elementos estruturais se unem nas ligações e a combinação de seus esforços solicitantes gera um comportamento muitas vezes complexo e diante da necessidade desses elementos desempenharem sua função estrutural da forma como foram projetados é necessário que se conheça o real comportamento das ligações e seus parâmetros: rigidez, resistência e ductilidade (Conceição, 2011). Neste trabalho, a ligação entre viga "I" e pilar de seção tubular retangular (RHS) será dada através de solda.

A adoção de ligações semi-rígidas para estruturas tubulares permite além do aprimoramento das considerações de projetos sobre deslocamento e restrição de rotação, uma economia pela utilização de perfis mais esbeltos em razão de um menor momento solicitante de cálculo e uma maior segurança onde uma ligação antes considerada como rotulada, agora é dimensionada como semirrígida, considerando-se uma parcela de transmissão de momento fletor.

2 METODOLOGIA

Coutinho (2015, p.19) afirma que "a principal característica de uma ligação é o seu comportamento momento-rotação, que representa o deslocamento relativo entre a viga e o pilar para um momento aplicado em função das suas condições de apoio". A relação momento versus rotação $M_x\Phi$ fornece os parâmetros necessários para a classificação da ligação, assim como a análise da estrutura na qual a ligação está inserida, e seu comportamento não-linear (Affonso, 2014). Os métodos para obtenção deste parâmetro foram análises teóricas e simulações numéricas através de elementos finitos.

Para todos os componentes dos modelos estudados, pilar e viga, foram aplicados os mesmos tipos de aço, sendo a tensão de escoamento igual a 345 Mpa, a tensão de ruptura igual a 450 MPa, o módulo de elasticidade do aço igual a 200000 MPa e o coeficiente de Poisson, 0,3.

2.1 Análise Teórica

A verificação dos modos de falhas das ligações entre vigas de perfis I e pilares tubulares de seção retangular se dará através de análises teóricas. Dentre as falhas destas ligações, destaca-se como objeto de estudo deste trabalho a plastificação da face frontal do pilar que serão verificadas pelas equações do momento resistente de cálculo de ligações soldadas entre viga I e pilar RHS, sem o efeito da carga axial e efeito da alma para a resistência das ligações, sendo a Eq. (1) prevista pelo CIDECT (Wardenier et al, 2010) e a Eq. (2) por Lu (1997).

$$M_{1,Rd} = f_{y0} t_0^2 \left(\frac{4}{\sqrt{1-\beta}} \right) (h_1 - t_1) \quad (1)$$

$$M_{1,Rd} = f_{y0} t_0^2 (h_1 - t_1) (0,5 + 0,7\beta) \frac{4}{\sqrt{1-0,9\beta}} \quad (2)$$

Onde $M_{1,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo, f_{y0} é a resistência ao escoamento do aço do pilar, t_0 é a espessura da coluna, β representa a razão entre a largura da mesa e largura da coluna, t_1 e h_1 representam respectivamente a espessura da mesa e altura da viga.

A rotação (Φ) pode ser apresentada, se considerando que os deslocamentos nas mesas superior e inferior são iguais, obtendo-se o deslocamento (Δ) na direção z do nó central do contato das malhas dispostas na mesa da viga e no pilar para cada modelo e, em seguida, dividindo-se este valor pela metade da altura do perfil ($h_1/2$) de cada viga e calculado através da Eq. (3).

$$\Phi = \frac{\Delta}{\frac{h_1}{2}} \quad (3)$$

Os limites de rigidez da ligação para a construção dos gráficos foram adotados em conformidade com o CIDECT (2010) através das Eq. (4) e (5), ligação rígida e ligação flexível, respectivamente, dispostas abaixo para estruturas não contraventadas.

$$S_{i\ ini} \geq \frac{25EI_b}{L_b} \quad (4)$$

$$S_{i\ ini} < \frac{0,5EI_b}{L_b} \quad (5)$$

Sendo o parâmetro $S_{i\ ini}$ a rigidez inicial da ligação, E é o módulo de elasticidade do aço, I_b e L_b são respectivamente a inércia em torno do eixo x e o comprimento da viga.

2.2 Análise Numérica

A organização da malha de elementos finitos se apresenta mais refinada na região da solda da ligação, onde é esperada uma maior concentração de tensões. O modelo foi desenvolvido utilizando elementos de casca com quatro nós, SHELL 181, existente na biblioteca de elementos do ANSYS 12.0.

Para simular as condições de biengastamento, as condições de contorno restringem todos os graus de liberdade dos nós situados nas seções transversais inferior e superior da extremidade do pilar, impedindo assim os deslocamentos e as rotações nas direções dos eixos x, y e z. A tabela 1 informa os dados dos nove modelos simulados.

Tabela 1 – Composição dos modelos desenvolvidos

Modelo	Perfil Viga	Perfil Pilar
M1	W200x15,0	220x220x10
M2	W200x26,6	220x220x10
M3	W200x41,7	220x220x10
M4	W200x15,0	220x220x16
M5	W200x26,6	220x220x16
M6	W200x41,7	220x220x16
M7	W200x15,0	220x220x20
M8	W200x26,6	220x220x20
M9	W200x41,7	220x220x20

A simulação do comportamento da ligação envolve solicitar a viga de modo a gerar flexão na mesma, induzindo assim a rotação da ligação. A solicitação foi feita por meio de aplicação de deslocamento na extremidade livre da viga, na direção vertical e sentido de cima para baixo. A análise numérica terá seus resultados validados em comparação com os resultados obtidos por meio das análises teóricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos Momentos Resistentes

Foram obtidos os momentos resistentes de cálculo de três maneiras diferentes: conforme as Eq. (1) e (2) e o valor do momento resistente máximo obtido através do modelo numérico. Os resultados encontrados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Momento resistente de cálculo

Modelo	Eq. (1) (kN m)	Eq. (2) (kN m)	$M_{rd\ num}$ (3) (kN m)	(3)/(1) (%)	(3)/(2) (%)
M1	36,25	28,40	23,98	66,15	84,43
M2	43,33	37,18	31,44	72,56	84,56
M3	53,32	47,94	41,28	77,42	86,11
M4	92,79	72,71	52,58	56,67	72,31
M5	110,93	95,17	71,11	64,10	74,72
M6	136,51	122,72	91,21	66,82	74,32
M7	144,99	113,61	54,49	37,58	47,96
M8	173,33	148,70	100,38	57,91	67,50
M9	213,29	191,75	127,76	59,90	66,62

Observa-se que há uma melhor correlação entre os resultados numéricos e a Eq. (2) sendo que, para os tubos de menor espessura, os resultados numéricos se aproximam mais dos analíticos. Para o modelo M7 destaca-se uma maior dispersão entre o resultado numérico e a previsão analítica, pelo fato dessa análise indicar que não há a plastificação da face frontal do pilar, como ocorre nos outros modelos. O modelo M7 apresenta plastificação nas faces das mesas, ocorrendo sua plastificação logo nos estágios iniciais de solicitação da estrutura.

3.2 Obtenção das Curvas Momento x Rotação

As curvas de Momento x Rotação são o principal parâmetro para avaliação da rigidez das ligações propostas neste trabalho. Para que a rotação seja calculada, é necessário obter os valores de deslocamentos horizontais (direção do eixo z do modelo) dos pontos no contato da viga com o pilar quando há a rotação da ligação.

As Fig. 1, 2 e 3 representam um comparativo das curvas Momento x Rotação entre os modelos que possuem ligações com pilares de mesmas dimensões.

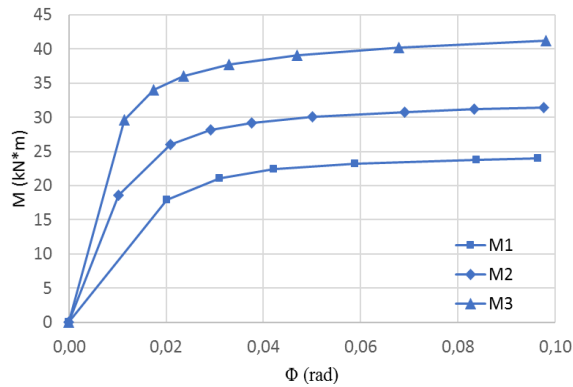


Figura 1 – Curva Momento x Rotação – M1 a M3.

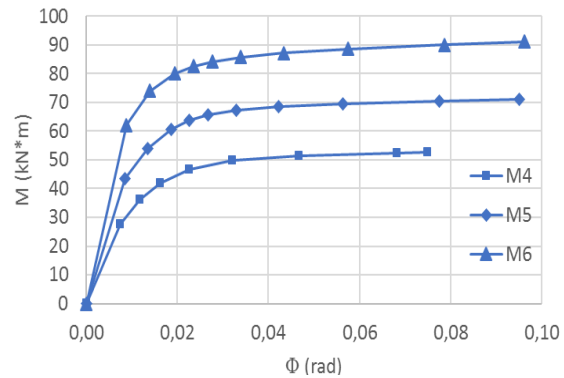


Figura 2 – Curva Momento x Rotação – M4 a M6.

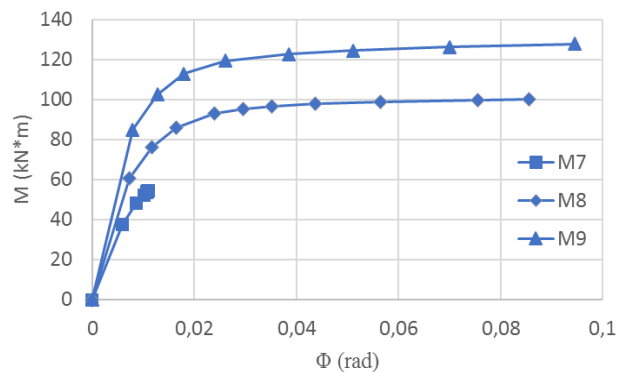


Figura 3 – Curva Momento x Rotação – M7 a M9.

A rigidez inicial da ligação de cada um dos modelos foi obtida por meio do cálculo da inclinação de uma reta tangente às curvas e os resultados foram retratados na Tabela 3.

Tabela 3 – Rigidez inicial dos modelos M1 a M9

Modelo	Momento (kN m)	Rotação (rad)	Rigidez inicial (kN m/rad)
M1	19,49	0,02560	761,52
M2	26,04	0,02090	1246,07
M3	34,02	0,01750	1943,97
M4	41,78	0,01630	2563,40
M5	60,73	0,01860	3265,00
M6	80,04	0,01940	4125,59
M7	37,77	0,00594	6357,66
M8	86,05	0,01648	5222,08
M9	102,60	0,01273	8059,57

Com base nas curvas Momento x Rotação pode-se observar que o modelo M7 possui um padrão diferente dos outros modelos apresentados. Esse comportamento se dá pelo fato da curva representar a rotação da viga em relação ao pilar, porém o modelo M7 apresenta uma característica praticamente rígida. Então o que ocorre é que a face do pilar, por ter espessura elevada e as dimensões da viga serem menores em relação aos modelos M8 e M9, isso gera maior resistência à rotação, apresentando maior rigidez.

A Fig. 4 mostra a curva Momento x Rotação dos modelos que possuem a viga W200x15,0 como componente de sua ligação com as espessuras do pilar utilizadas nesse trabalho (10mm, 16mm e 20mm) e outros dois modelos de ligação com a respectiva viga e espessuras do pilar de 18mm e 22mm. Tendo-se os parâmetros W_x e Z_x como sendo $130,5\text{cm}^3$ e $147,9\text{cm}^3$ respectivamente, foram calculados o momento de escoamento e momento de plastificação através das Eq. (6) e (7) respectivamente, sendo representados no gráfico como retas paralelas ao eixo das abscissas. O resultado das Eq. (6) e (7) foram 45,02kN m e 51,02kN m respectivamente.

$$M_y = W_x f_y \quad (6)$$

$$M_{pl} = Z_x f_y \quad (7)$$

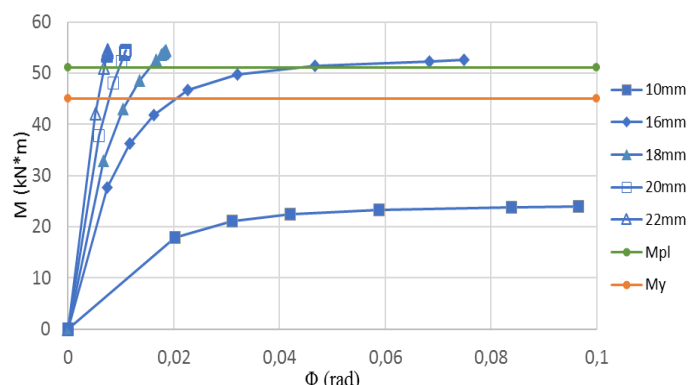


Figura 4 – Curva Momento x Rotação – Vigas W200x15,0.

Como se pode observar, o momento resistente das ligações dos modelos com espessura de 18mm, 20mm e 22mm atingem o momento de plastificação da seção, indicando que o mecanismo de falha passa a ser a viga e não a face frontal do pilar.

3.3 Classificação das Ligações

Com os dados obtidos nas modelagens e os estudos realizados, as ligações podem ser classificadas quanto à sua rigidez. Os parâmetros adotados para as ligações consideradas rígidas e flexíveis seguem as prescrições do CIDECT (2010) detalhadas pelas Eq. (4) e (5) deste trabalho.

Para a apresentação dos resultados de classificação de rigidez, as ligações foram organizadas quanto aos índices adimensionais β (Eq. (8)) e 2γ (Eq. (9)) presentes na Tabela 4, característicos em análises de estruturas tubulares.

$$\beta = \frac{b_f}{b_0} \quad (8)$$

Sendo b_f a largura da mesa da viga e b_0 a largura do pilar.

$$2\gamma = \frac{b_0}{t_0} \quad (9)$$

Com t_0 sendo a espessura do pilar e b_0 a largura do pilar.

A classificação das ligações conforme os limites calculados, está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação de Rigidez - M1 a M9

2γ	β	0,45	0,60	0,75
22	S_{isup} (kN m/rad)	65250	130550	205700
	S_{inum} (kN m/rad)	761,52	1246,07	1943,97
	S_{iinf} (kN m/rad)	1305	2611	4114
	Classificação	Flexível	Flexível	Flexível
13,75	S_{isup} (kN m/rad)	65250	130550	205700
	S_{inum} (kN m/rad)	2563,40	3265,01	4125,59
	S_{iinf} (kN m/rad)	1305	2611	4114
	Classificação	Semi-Rígido	Semi-Rígido	Semi-Rígido
11	S_{isup} (kN m/rad)	65250	130550	205700
	S_{inum} (kN m/rad)	6357,66	5222,08	8059,57
	S_{iinf} (kN m/rad)	1305	2611	4114
	Classificação	Semi-Rígido	Semi-Rígido	Semi-Rígido

A partir dos resultados obtidos pelos diagramas $Mx\phi$ da ligação obteve-se a rigidez das ligações, determinada a partir do método da rigidez inicial. Na Tabela 5 tem-se os valores da rigidez, K da ligação para os modelos estudados e a Fig. 5 apresenta a curva Rigidez $K/(E t_0)$ versus $\beta/2\gamma$ para análise gráfica do comportamento de rigidez.

Os valores apresentados nas três primeiras linhas da Tabela 5, caracterizados pelo pilar de espessura de 6,4mm, são uma representação dos modelos estudados por Rocha (2016).

Tabela 5 – Parâmetros K e $K/(E t_0)$ - M1 a M9

Pilar	Viga	$\beta/2\gamma$	K (kN m/rad)	$K/(E t_0)$
220x220x6,4	W 200x15,0	0,01308	193,45	0,0001511
	W 200x26,6	0,01744	484,76	0,0003787
	W 200x41,7	0,02180	671,74	0,0005248
220x220x10	W 200x15,0	0,02045	761,52	0,0003808
	W 200x26,6	0,02727	1246,07	0,0006230
	W 200x41,7	0,03409	1943,97	0,0009720
220x220x16	W 200x15,0	0,03272	2563,40	0,0008011
	W 200x26,6	0,04363	3265,01	0,0010203
	W 200x41,7	0,05454	4125,59	0,0012892
220x220x20	W 200x15,0	0,04090	6357,66	0,0015894
	W 200x26,6	0,05454	5222,08	0,0013055
	W 200x41,7	0,06818	8059,57	0,0020149

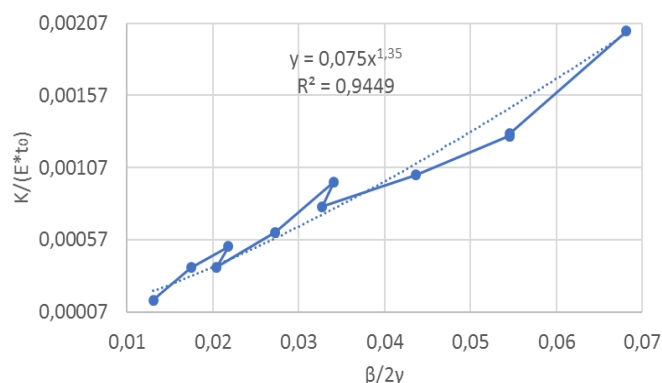


Figura 5 – Rigidez $K/(E \cdot t_0)$ x $\beta/2\gamma$ – M1 a M9.

A expressão da linha de tendência que mais se adequou aos modelos é em forma de potência. Ajustando os parâmetros x e y em função dos dados considerados na análise, pode-se reescrever na forma da Eq. (10) como mostra a seguir:

$$K = 0,075 E t_0 \left(\frac{\beta}{2\gamma} \right)^{1,35} \text{ (kN m/rad)} \quad (10)$$

Na Fig. 5, o valor de M7 foi desconsiderado pelo fato deste modelo apresentar plastificação das mesas da viga, e não a plastificação da face frontal do pilar que é objeto deste trabalho.

4 CONCLUSÕES

Para os resultados analíticos observa-se uma melhor correlação entre os momentos resistentes da Eq. (2) e do modelo numérico. Para o modelo M7 observa-se uma maior dispersão do resultado, pelo fato desse modelo de ligação apresentar plastificação na região das mesas próximo ao seu contato com o pilar e não na face frontal do pilar, como ocorre nos outros modelos.

Os resultados obtidos demonstram a necessidade de se considerar o tipo de ligação com a possibilidade desta ser flexível ou semi-rígida e não apenas adotá-la como rígida, como comumente é feito para concepção de projetos. Essa consideração pode gerar maior economia e considerações de estabilidade estrutural mais favoráveis.

Os resultados obtidos nesse trabalho não são conclusivos, mas pode-se obter uma equação para predição da rigidez inicial desse tipo de ligação. Para se obter uma análise mais abrangente é necessário a realização de análises experimentais e uma quantidade maior de modelagens numéricas. Esses resultados não retiram a necessidade de se considerar a influência que as esbeltezas dos elementos exercem na classificação das ligações.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEG, e à Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

Affonso, G. R., 2014. Avaliação de ligações entre vigas de perfil I ou H e colunas em perfis tubulares circulares. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

CIDECT, 2010. Wardenier, J., Packer, J. A., Zhao, X. -L., van der Vegte, G. J. Hollow section in structural applications.

Conceição, J. L., *Ligação mista viga-pilar resistente a momento*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

Lu, L. H., 1997. The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections, PhD Thesis, Delft University, Netherlands.

Rocha, B. S., Neto, J. G. R. *Análise de ligações soldadas entre vigas de seção “I” e pilares em perfis tubulares*. XXXVII CILAMCE, 2016.