



ANÁLISE DE LIGAÇÕES SOLDADAS ENTRE VIGAS DE SEÇÃO “I” E PILARES EM PERFIS TUBULARES

Brendda Santos Rocha

Juliano Geraldo Ribeiro Neto

eng.brendda@gmail.com

julianogeraldo.puc@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO

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

Resumo. *O estudo da rigidez de ligações presente neste trabalho será desenvolvido a partir de ligações soldadas compostas por vigas em perfis metálicos de seção “I” e pilares tubulares de seção retangular. Para obtenção de resultados, serão realizadas análises numéricas fundamentadas no Método dos Elementos Finitos e modeladas por meio do software comercial ANSYS. Será estudado um modelo de ligação entre viga e pilar de extremidade, considerando o biengastamento das extremidades do pilar, sem a aplicação de carga axial, e a flexão da viga por meio de controle de deslocamento. Como parâmetro de análise, é adotada uma seção tubular retangular única para o pilar e variada a esbeltez da viga, trabalhando com três diferentes seções de perfil tipo “I” laminado. Foram realizadas análises numéricas e teóricas para verificação da rigidez da ligação, sendo o comportamento semirrígido destas ligações caracterizado por meio das curvas momento-rotação relativa dos modelos. Foi verificado também o deslocamento vertical do modelos, em comparação com as prescrições analíticas.*

Palavras-chave: *Seções retangulares, Ligações, Semirrigidez, Método dos elementos finitos, Análise numérica.*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do emprego dos sistemas construtivos em aço se deve a vários fatores vantajosos em relação às soluções convencionais, dentre os quais se destacam: a racionalização de materiais e mão-de-obra, em razão da adoção de sistemas industrializados; a facilidade de compatibilização com outros materiais; o menor prazo de execução; a possibilidade de reciclagem e, com isso, a preservação do meio ambiente que representa uma das questões mais discutidas durante as fases de planejamento e projeto.

O dimensionamento de estruturas envolve inúmeras variáveis e, quando tratada como um todo, o comportamento dos nós e o tipo de ligação são determinantes no comportamento estrutural. Machado (2013) afirma que, a influência dos tipos de ligações é ainda mais relevante devido à grande variedade de configurações e dispositivos que podem ser utilizados para conectar vigas e pilares, capazes de gerar descontinuidades geométricas e alterar o comportamento linear da estrutura. Para este estudo, a ligação entre vigas "I" e pilares em seção tubular retangular será dada através de solda, sendo este o tipo mais simples adotado para representar o comportamento engastado entre peças de geometrias diferentes.

A adoção de conexões semirrígidas para ligações entre estruturas tubulares mediante o estudo e conhecimento prévio de suas propriedades em serviço permite, além do aprimoramento das considerações de projetos sobre deslocamentos e restrição de rotações, a realização de um dimensionamento utilizando perfis mais esbeltos em razão de um menor momento solicitante de cálculo. Isto irá resultar em um menor peso de aço, redução de custos consequentes do processo de soldagem, gerando economia e melhoria estética.

2 METODOLOGIA

O comportamento estrutural da ligação é conhecido pela determinação da relação momento-rotação ($M_x\Phi$), que é capaz de fornecer as informações necessárias para a classificação da ligação e da análise da estrutura em questão, considerando a sua resposta não-linear. O diagrama $M_x\Phi$ pode ser obtido por vários métodos e, para este trabalho, serão realizadas análises teóricas e simulações numéricas em elementos finitos.

Para obtenção do comportamento global das ligações em termos de rigidez, a análise foi realizada de forma não linear geométrica e de material. Isto significa que, para todos os componentes dos modelos estudados, pilar e viga, serão aplicados os mesmos materiais, sendo as tensões de escoamento e ruptura, 345 MPa e 450 MPa respectivamente, o módulo de elasticidade do aço igual a 200000 MPa e o coeficiente de Poisson, 0,3.

Na 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 oito nós, SHELL 281, existente na biblioteca de elementos do ANSYS 16.0 e representado na Fig. 1. Este elemento possui seis graus de liberdade em cada nó, translação nas direções x, y e z e rotações em x, y e z.

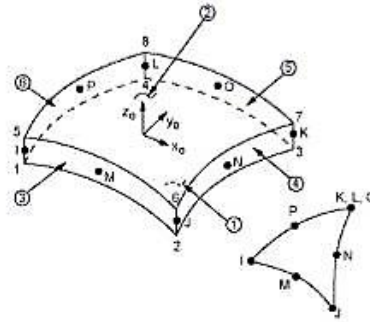


Figura 1. Elemento de casca SHELL 281 (ANSYS,2016)

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 configuração final do modelo pode ser observada na Fig. 2.

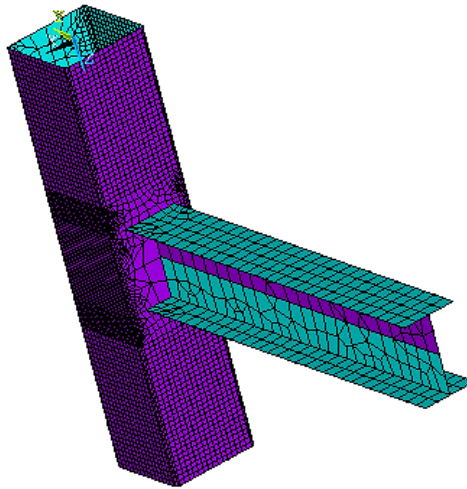


Figura 2. Modelo adotado para o trabalho com aplicação de malha de elementos finitos

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 em pequenos incrementos até o momento em que não ocorra mais a convergência do processamento do modelo. A análise numérica terá seus resultados validados em comparação com os resultados obtidos por meio das análises teóricas.

2.1 ANÁLISE TEÓRICA

Inicialmente, a verificação do comportamento das ligações entre vigas “I” e pilares tubulares de seção retangular se dará através de análises teóricas. Para isto, faz-se necessário o cálculo dos momentos resistentes, que podem ser calculados analiticamente através das Eq. (1) e (2), sendo (1) prevista pelo CIDECT (Wardenier et al, 2010) e (2) por Lu (1997).

$$M_{1,Rd} = f_{y0} t^2_0 \left(\frac{4}{\sqrt{1-\beta}} \right) (h_1 - t_1) \quad (1)$$

$$M_{1,Rd} = f_{y0} t^2_0 (h_1 - t_1) (0,5 + 0,7\beta) \frac{4}{\sqrt{1-0,9\beta}} \quad (2)$$

Onde $M_{I, Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo, f_{y0} é a resistência ao escoamento do aço do pilar, t_o a espessura da coluna, β é a razão entre a largura da mesa e largura da coluna. Os dados de entrada t_1 e h_1 representam a espessura da mesa e altura da viga, respectivamente. Para a análise de deslocamento de cada viga que compõe os modelos, os conhecimentos da Teoria Clássica de Vigas definem que o deslocamento previsto para o modelo estático adotado, viga em balanço, obedece a Eq. (3) a seguir.

$$\delta = \frac{-PL^3}{3EI} \quad (3)$$

Em que δ é o deslocamento e P a carga, ambos localizados na extremidade do balanço; os parâmetros geométricos são compostos por L , que representa o comprimento da peça em balanço e I , o valor da inércia da seção. A característica do material é dada por E , o módulo de elasticidade, neste trabalho, o aço.

A rotação (Φ) pode ser apresentada, se considerando que os deslocamentos nas mesas superior e inferior são iguais, obtendo-se o deslocamento na direção y do nó central do contato das malhas dispostas na viga e no pilar para cada modelo e, em seguida, dividindo-se este valor pela metade da altura do perfil de cada viga, de acordo com o demonstrado na Eq. (4).

$$\Phi = \frac{\Delta}{\frac{h_1}{2}} \quad (4)$$

Os limites de rigidez para a construção dos gráficos foram adotados em conformidade com o CIDECT (2010) através das Eq. (5) e (6), ligação rígida e ligação flexível, respectivamente, dispostas abaixo para estruturas não contraventadas.

$$S_{i, ini} \geq \frac{25 E I_b}{L_b} \quad (5)$$

$$S_{i, ini} < \frac{0,5 E I_b}{L_b} \quad (6)$$

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 na direção x e o comprimento da viga.

2.2 ANÁLISE NUMÉRICA

Os modelos desenvolvidos na interface Mechanical APDL do software ANSYS (2016) são capazes de fornecer diversos dados pertinentes às análises estruturais. Os resultados para o deslocamento na direção negativa do eixo z na extremidade da viga em balanço é correspondente às respectivas reações de apoio no topo e na base do pilar (R1 e R2). O esquema estático descrito é mostrada na Fig. 3.

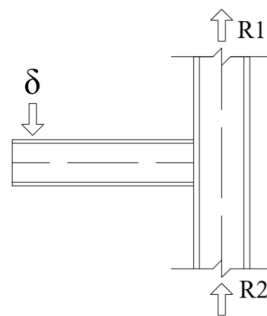


Figura 3. Esquema estático aplicado para o processamento dos modelos numéricos

O deslocamento obtido para cada uma das cargas P resultantes da soma das reações de apoio dos modelos submetidos à flexão será comparado com os deslocamentos extraídos através da análise em etapas, conforme método dos elementos finitos, sabendo-se que estes resultados, ao serem plotados em gráfico, não possuirão comportamento linear.

A rigidez das ligações propostas será apresentada por meio das curvas momento-rotação, de modo que o momento de força será gerado pela multiplicação entre as cargas P e a distância do ponto de aplicação destas, isto é, o próprio comprimento das vigas, igual a 1000 milímetros. A tabela 1 informa a composição de cada um dos modelos calculados neste trabalho.

Tabela 1. Composição dos modelos desenvolvidos

Modelo	Perfil Viga	Perfil Pilar
M1	W200x15,0	220x220x6,4
M2	W200x26,6	220x220x6,4
M3	W200x41,7	220x220x6,4

Para obtenção do comportamento global das ligações em termos de rigidez, a análise foi realizada de forma não linear geométrica e de material. Isto significa que, para todos os componentes dos modelos estudados, pilar e viga, serão aplicados os mesmos materiais, sendo as tensões de escoamento e ruptura, 345 MPa e 450 MPa respectivamente, o módulo de elasticidade do aço igual a 200000 MPa e o coeficiente de Poisson, 0,3.

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) descritas anteriormente neste trabalho e o valor obtido através da reta tangente traçada nos diagramas de momento-rotação. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos e a relação observada entre eles.

Tabela 2. Momento resistente de cálculo

Modelo	eq. (1) (kN*m)	eq. (2) (kN*m)	M_{rdnum} (3) (kN*m)	(3)/(1) (%)	(3)/(2) (%)
M1	14,847	11,634	12,21	82,24	104,95
M2	17,750	15,227	15,6	87,89	102,45
M3	21,841	19,635	20,35	93,17	103,64

Observa-se uma correlação de 82,24 à 93,17% entre o modelo numérico e a Eq. 1. Para a Eq. observa-se uma correlação variando de 102,45 à 104,95%. Verifica-se dessa forma que o modelo numérico apresenta um comportamento intermediário entre a equação (1) prescrita pelo CIDECT (2010) e o modelo ajustado proposto por Lu (1997).

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA – MEF – ANSYS 16.0

Os modelos desenvolvidos são capazes de fornecer diversos dados pertinentes às análises estruturais. A Tabela 3 apresenta os resultados para o deslocamento na direção negativa do eixo z na extremidade da viga em balanço e o valor de P correspondente ao somatório das reações de apoio verticais.

Tabela 3. Análise Numérica – MEF – M3

DESLOC. M1 (mm)	P(N) M1	DESLOC. M2 (mm)	P(N) M2	DESLOC. M3 (mm)	P(N) M3
0	0	0	0,00	0	0
12,50	4909,82	22,50	11036,14	5,63	7230,80
25,00	8187,32	33,75	13074,67	11,25	11704,31
43,75	10601,57	45,00	14101,83	19,69	15555,36
53,13	11343,65	61,88	14939,78	26,02	17072,39
62,50	11851,78	87,19	15596,70	32,34	17915,60
71,88	12211,14	100,00	15817,12	41,84	18780,29
85,94	12557,41	-	-	56,07	19615,58
100,00	12771,52	-	-	77,43	20354,20
-	-	-	-	100,00	20840,40

3.3 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

Ao fixar os valores de P como os dispostos anteriormente na Tabela 3, é possível calcular analiticamente os resultados de deslocamento através da equação (3) apresentada no item 2.1. Os resultados para os modelos M1, M2 e M3 são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4. Análise Teórica – M3

$\delta=PL^3/3EI$	$\delta=PL^3/3EI$	$\delta=PL^3/3EI$
M1	M2	M3
(mm)	(mm)	(mm)
0	0	0,00
0,63	0,70	0,29
1,05	0,83	0,47
1,35	0,90	0,63
1,45	0,95	0,69
1,51	1,00	0,73
1,56	1,01	0,76
1,60	-	0,79
1,63	-	0,82
-	-	0,84

3.4 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. Os valores de rotação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados para a curva $Mx\Phi$ – M1

Φ	Φ	Φ
M1	M2	M3
(rad)	(rad)	(rad)
0	0	0
0,115	0,206	0,050
0,239	0,311	0,101
0,412	0,416	0,179
0,503	0,574	0,238
0,594	0,812	0,298
0,686	0,933	0,387
0,823	-	0,521
0,961	-	0,723
-	-	0,934

A Fig. 4 a seguir representa os gráficos $Mx\Phi$ de acordo com os dados calculados anteriormente. 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 pertencem à Tabela 6.

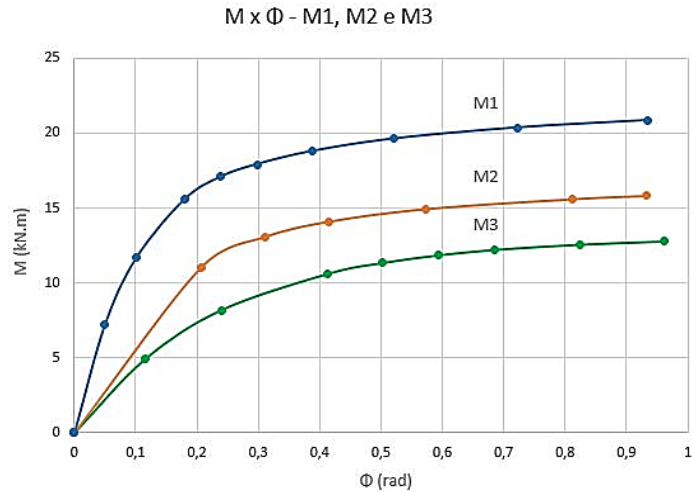


Figura 4. Curva Momento x Rotação - M1, M2 e M3

Tabela 6. Rigidez inicial dos modelos M1, M2 e M3

Modelo	Momento (kN*m)	Rotação (rad)	Rigidez inicial (kNm/rad)
M1	4,91	0,115	42,70
M2	11,04	0,206	53,59
M3	15,56	0,179	86,93

A Fig. 5 apresenta a curva Rigidez $K/(Et_0) \times \beta/2\gamma$ para análise gráfica do comportamento de rigidez.

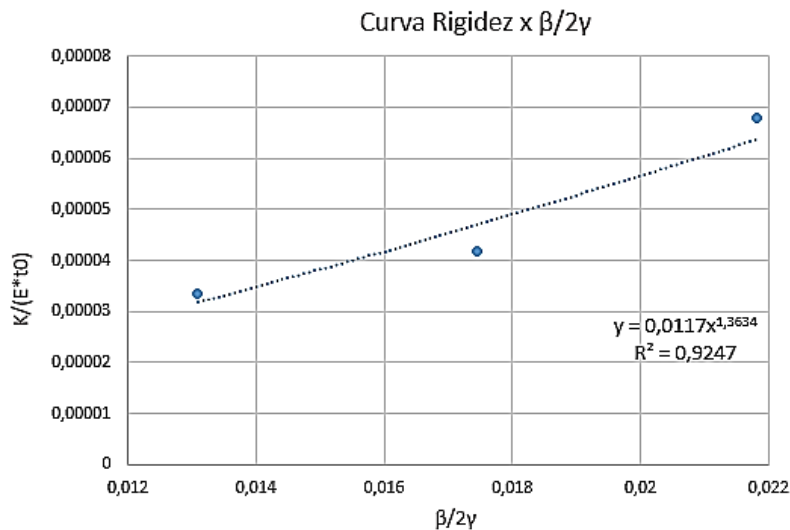


Figura 5. Rigidez $K/(Et_0) \times \beta/2\gamma$ - M1, M2 e M3

A equação da linha de tendência mais adequada é dada por:

$$\frac{K}{E*t_0} = 0,0117 * \left(\frac{\beta}{2\gamma}\right)^{1,3634} \quad (9)$$

4 CONCLUSÃO

Observa-se uma boa correlação entre os momentos resistentes do modelo numérico e os valores analíticos obtidos pelas prescrições teóricas constantes no CIDECT (2010) e Lu (1997). Através dos resultados de rigidez inicial obtidos dos modelos numéricos, a classificação das ligações modeladas em relação aos limites estabelecidos pelo CIDECT é de rótula. Este resultado da classificação confirma o comportamento já observado quanto aos deslocamentos verticais. Apesar da concepção usual de ligação engastada como critério prático de projeto, observa-se um comportamento contrário para as ligações estudadas que se comportaram como rótulas em função da pouca rigidez dos componentes do modelo.

Os resultados desse trabalho não são totalmente conclusivos, mas indicam uma grande importância de se considerar as esbeltezes dos elementos componentes da conexão na determinação do comportamento flexível ou rígido de uma ligação. Para a determinação de critérios normativos de projetos mais representativos do comportamento das ligações, torna-se necessário a realização de uma quantidade mais extensa de modelagens numéricas a fim de realizar uma análise paramétrica mais abrangente. Um outro ponto que deve ser ressaltado é a necessidade de análises experimentais que possibilitem uma validação da modelagem realizada ou forneçam parâmetros de ajuste para a melhor calibração dos modelos.

5 AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Gabriel Vieira Nunes do Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG Campus Congonhas, pelo grande auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

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

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

Machado, R. B., 2013. *Análise numérica e experimental de ligações soldadas na direção de menor inércia do pilar*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto.

Nunes, T. C., 2012. *Análise de ligações metálicas soldadas dentre pilar de seção RHS e viga de seção I*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

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 de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.