

ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES METÁLICAS A PARTIR DA ABNT NBR 8800 (2008)

CLADILSON NARDINO^{1*}; VINÍCIUS HANSER DE SOUZA²; TATIANI ZANONI³; MARCO ANDRE ARGENTA⁴, MARCOS ARNDT⁵

¹Mestrando em Estruturas, UFPR, Curitiba-PR, clanardino@gmail.com

²Mestrando em Estruturas, UFPR, Curitiba-PR, ovinicius10@outlook.com

³Mestranda em Estruturas, UFPR, Curitiba-PR, tatiani_z@hotmail.com

⁴Dr. em Métodos Numéricos, Prof. Adjunto DCC, UFPR, Curitiba-PR, marco.argenta@gmail.com

⁵Dr. em Métodos Numéricos, Prof. Adjunto DCC, UFPR, Curitiba-PR, arndt.marcos@gmail.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: No dimensionamento estrutural de uma estrutura metálica é de suma importância ter conhecimento da rigidez das ligações utilizadas, pois essas caracterizam o comportamento dos esforços na estrutura. Objetiva-se neste trabalho a obtenção da rigidez de ligações do tipo momento com talas (“*flange plate connection*”), determinar os parâmetros que alteram sua rigidez e classificá-la segundo os limites da ABNT NBR 8800 (2008). A ligação utilizada foi baseada na ligação presente no livro de Queiroz e Vilela (2012, p. 93). A geometria tridimensional das ligações foi feita com auxílio do programa OnShape e exportada para o ANSYS Workbench, onde foram definidas as características dos materiais, as condições de contorno e realizada a simulação do carregamento. Foram feitas cinco simulações, variando o número de parafusos e a espessura das talas das mesas da viga, o número e diâmetro dos parafusos das talas de alma da viga e o uso ou não de enrijecedores no pilar. A determinação da rigidez da ligação foi feita pela divisão entre o momento fletor atuante na ligação e a rotação relativa da viga em relação ao pilar. Os resultados demonstram que as variações realizadas interferem na rigidez das ligações e em sua classificação segundo a ABNT NBR 8800 (2008), sendo que dos cinco modelos simulados, três foram classificados como rígidos, um semirrígido e um flexível.

PALAVRAS-CHAVE: Ligações estruturais, estruturas metálicas, rigidez, ligação a momento com talas, modelagem numérica.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION BY STIFFNESS OF STEEL CONNECTIONS ACCORDING TO NBR 8800 (2008)

ABSTRACT: In the design of steel structures, it is very important to have knowledge of the stiffness of the connections used, because they will characterize the behavior of the stresses in the structure. The objective of this study is to obtain the stiffness of a flange plate connection, determine the parameters that change their stiffness and classify it according to the limits of the NBR 8800 (2008). The 3-D geometry was made on OnShape, and exported to Ansys Workbench, where the material characteristics and boundary conditions were defined, and the simulation was performed. Five simulations were made, the variations between them are the number of bolts and the thickness of the flange plate, number and diameter of the bolts on web plate, and the presence or not of column stiffeners. The stiffness was determined by the division of the bending moment acting on the connection and the relative rotation between the beam and the column. The results show that the variations considered interfere on the classification according to ABNT NBR 8800 (2008). Three of the five connections simulated were classified as rigid, one of them is flexible and one is semi rigid.

KEYWORDS: Structural connections, steel structures, stiffness, flange plate connection, numerical modelling.

INTRODUÇÃO

O principal objetivo de uma estrutura é transportar e transmitir cargas para as fundações de forma segura, garantindo bom desempenho e boas condições de funcionamento (Chan e Chui, 1999). As ligações estruturais desempenham papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço, pois são a partir delas que esforços solicitantes são transmitidos entre os elementos estruturais portantes, tais como vigas, pilares e contraventamentos, até chegar à fundação.

Na análise e dimensionamento de estruturas de aço convencionais, as ligações viga-pilar são idealizadas como perfeitamente rígidas ou idealmente flexíveis. O ângulo entre os membros adjacentes na ligação rígida mantém-se inalterado, e na ligação idealmente flexível nenhum momento será transferido entre os membros adjacentes e a rotação relativa é liberada (Chan e Chui, 1999).

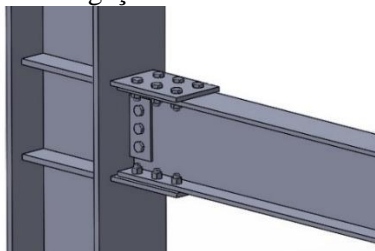
A ABNT NBR 8800 (2008) aponta parâmetros, coeficientes e limites para classificação da rigidez das ligações metálicas. Barbosa (2006) afirma que na consideração da ligação como rígida existirão elevadas solicitações nos pilares e um alívio das solicitações no vão central da viga. Entretanto a viga continuará altamente solicitada, e desta forma tem-se um desperdício de material nos pilares; por sua vez, a suposição de ligação flexível implica em uma maior solicitação da viga e a rigidez da ligação se torna pequena em comparação à rigidez do elemento conectado. Portanto, o comportamento intermediário semirrígido pode otimizar as solicitações nos elementos.

Devido à importância da classificação da ligação para o dimensionamento estrutural, este trabalho visa determinar a rigidez da ligação a partir de análise numérica computacional de ligações metálicas do tipo ligação a momento com talas (“*flange plate connection*”), e classificá-las segundo a ABNT NBR 8800 (2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

A ligação em estudo, adaptada de Queiroz e Vilela (2012, p. 93), é apresentada na figura 1. A ligação é composta por talas de mesa e alma soldadas ao pilar e parafusadas à viga. Serão abordados neste trabalho cinco variações deste modelo, houve mudança no diâmetro dos parafusos, na espessura da tala da mesa da viga, na quantidade de parafusos da tala de alma da viga, remoção das talas das mesas da viga e o uso ou não de enrijecedores do pilar, como descrito a seguir. As ligações e os elementos conectados estão dimensionados de acordo com os critérios de segurança apresentados na NBR 8800 (2008), quanto aos diferentes estados limites últimos para cada solicitação de cálculo, como tração, compressão, cisalhamento e flexão dos componentes da ligação (NBR 8800, 2008).

Figura 1. Representação tridimensional da ligação metálica.



Para análise estrutural elástica, a NBR 8800 (2008) considera que os seguintes limites de classificação da rigidez da ligação são válidos:

Para ligações flexíveis (rotuladas):

Para ligações rígidas:

Onde

$K_{i,0}$, $K_{i,0}$

é a rigidez rotacional inicial da ligação (kN.cm/rad), correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação

($K_{i,0}$, $K_{i,0}$)

);

é o módulo de elasticidade do material (kN/cm²);

é o momento de inércia da viga (cm^4);

L_v

é o comprimento efetivo da viga (cm). O limite para ligações rígidas só pode ser aplicado em estruturas em que, para cada andar, é satisfeita a seguinte condição:

(3)

Onde:

$\sum I_{c,i}$

é o valor médio

$\sum I_{v,i}$

/

$\sum I_{c,i}$

de todas as vigas no topo do andar;

$\sum I_{v,i}$

é o valor médio

$\sum I_{c,i}$

/

$\sum I_{v,i}$

de todos os pilares no plano do andar considerado.

Entretanto,

se

$\alpha < 0,1$,

atender à condição da inequação de ligações rígidas mas

$\alpha > 0,1$

/

$\alpha < 0,1$

$< 0,1$, a ligação deve ser modelada como semirrígida.

Neste trabalho será analisada apenas a ligação viga-pilar, sem considerar o impacto dos pilares e vigas do andar todo, logo a verificação da equação 3 será desconsiderada. O item 6.1.2.1 da NBR 8800 (2008) ainda complementa que “em qualquer caso, para análise elástica, a ligação pode ser considerada semirrígida, com a rigidez

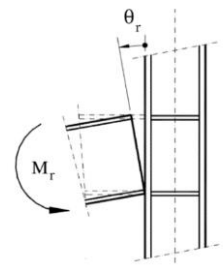
αI , onde

constante durante todo o carregamento”.

Ramires (2010) expõe que a grande maioria das ligações utilizadas na construção em aço não se comporta como nós rígidos ou flexíveis, mas de um modo intermediário, colocando em dúvida o modelo considerado da estrutura. Nos projetos estruturais a consideração da semirrígidez na etapa de projeto tem recebido cada vez mais atenção, devido a sua capacidade de dissipação de energia e eficiência de fabricação (Fang *et al.*, 2013). Higaki (2014, p. 86) acrescenta que é correto considerar um comportamento intermediário na modelagem, sendo este denominado de semirrígido.

Maggi (2004) expõe que o comportamento de uma ligação sujeita à flexão pode ser caracterizado a partir da relação entre o momento fletor solicitante e a rotação relativa entre os elementos conectados (figura 2). Tal relação pode ser representada em um diagrama momento-rotação, cujo coeficiente angular é a rigidez rotacional da ligação.

Figura 2. Rotação relativa entre viga e pilar.



Fonte: Higaki, 2014.

A curva momento-rotação da ligação é não linear, essa não linearidade se dá devido a fatores como a descontinuidade do material imposta pela conexão, o escoamento local dos elementos da ligação, flambagem local das placas de ligação, entre outros (Chen *et al.*, 1995). Neste trabalho será

utilizada a rigidez inicial da ligação com modelo linear da curva momento-rotação (NBR 8800, 2008). Segundo Santo (1998), a grande vantagem do modelo linear é a facilidade para usá-lo, já que a rigidez inicial da ligação é usada para representar todo seu comportamento frente ao carregamento.

As ligações analisadas são compostas por um pilar (CVS 350x105) com comprimento total de 4 metros, engastado nas duas extremidades, sendo que as ligações estão centradas no comprimento do pilar; a viga (VS 250x37) tem 2 metros de comprimento, ligada ao pilar por meio de talas parafusadas à mesa e à alma. As talas são ligadas ao pilar por meio de soldas de filete de 9 mm, suas dimensões serão descritas posteriormente nos modelos utilizados. Os parafusos adotados para esta análise são de cabeça sextavada, tipo ASTM A307, com diâmetro de acordo com cada modelo e furo padrão conforme NBR 8800 (2008). Os parafusos das talas de mesa estão dispostos simetricamente em relação à linha central da alma da viga, com dois parafusos por linha, os parafusos das talas de alma estão dispostos em uma única linha e espaçados igualmente entre si.

O modelo 1 (modelo base para todas as variações) apresenta talas de mesa com 16 mm de espessura e as talas de alma com 6,3 mm, os parafusos têm 16 mm de diâmetro, sendo 6 parafusos em cada mesa e 3 parafusos na alma da viga e o pilar contém enrijecedores. No modelo 2 foi mudado o diâmetro dos parafusos da alma para 19mm, o restante das características foram mantidas. No modelo 3 foi reduzida a espessura das talas da mesa da viga para 12,5 mm. No modelo 4 foi retirado uma linha de parafusos e reduzido o comprimento das talas das mesas da viga. No modelo 5 foram retiradas as talas de mesa, foi aumentado o comprimento das talas de alma e acrescentado um parafuso a ela e não há presença de enrijecedores no pilar.

A geometria tridimensional das ligações foi feita com auxílio do programa OnShape (2014) e exportada para o ANSYS Workbench versão 15.0, onde foram definidas as características dos materiais, as condições de contorno e feita a simulação do carregamento. Foram definidos os apoios do pilar (engastados) e as condições de contorno para todas as áreas de contato entre os perfis e talas e entre talas e parafusos; para essas áreas, foram considerados contatos do tipo aderência total (*bonded*).

A malha foi gerada de forma que a concentração de elementos fosse mais densa na região de atuação da ligação e menos densa nas extremidades do pilar e viga, onde a distribuição de tensões não é significativa para a análise do comportamento da ligação em específico. Uma carga concentrada de 30 kN foi aplicada na extremidade da viga, no centro geométrico da seção transversal, transversalmente ao eixo longitudinal da viga, no sentido negativo do eixo vertical, de modo que não fosse ultrapassada a tensão de escoamento do aço dos perfis ou a resistência última dos parafusos.

Para determinação da rigidez da ligação foi considerada a rotação relativa entre a viga e o pilar. O ângulo de giro é calculado entre a linha de simetria da viga no plano de cisalhamento da ligação, na configuração deformada, e a linha de simetria da alma do perfil do pilar também no plano de cisalhamento da ligação.

A rotação da viga e pilar foi calculada com auxílio da equação da linha de tendência linear dos pontos sobre o eixo de simetria vertical da viga e pilar, o cálculo da rigidez rotacional das ligações se dá pela divisão entre o momento aplicado na ligação e a rotação da ligação:

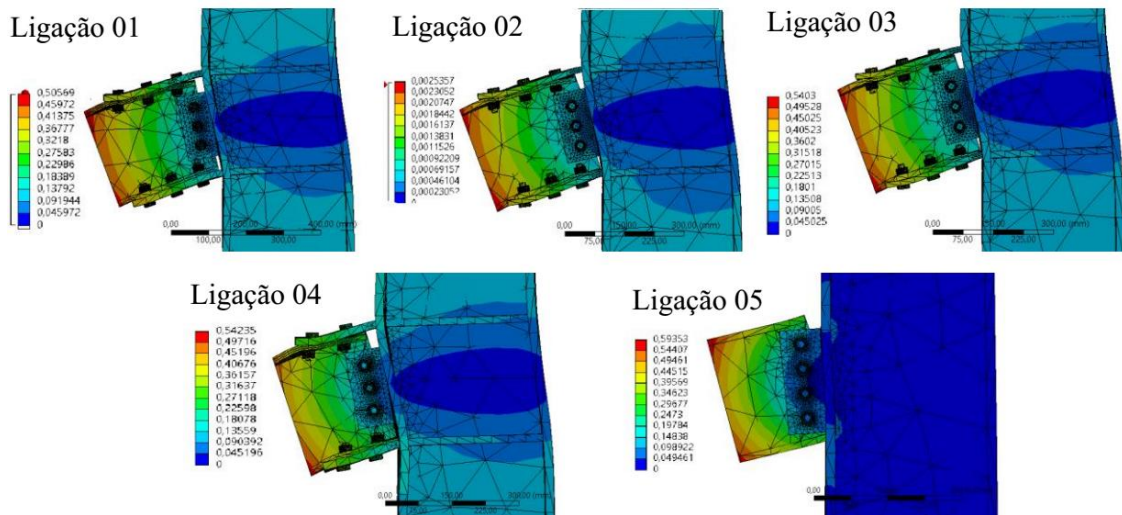
(4)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os limites para a classificação da rigidez das ligações calculados segundo a norma NBR 8800 (2008) são: maior ou igual a 132.871,97 kN.m/rad para ligações rígidas e menor ou igual a 2.657,44 kN.m/rad para ligações flexíveis.

O modelo 1 apresentou rigidez de 307.894.634,84 kN.m/rad; o modelo 2 apresentou uma rigidez na ordem de 10^{12} kN.m/rad; o modelo 3 apresentou rigidez de 205.967.259,47 kN.m/rad; o modelo 4 apresentou rigidez de 4.315,97 kN.m/rad e o modelo 5 apresentou rigidez de 2.258,91 kN.m/rad. Segundo os limites apresentados pela norma, os modelos de ligação 1, 2 e 3 são classificados como rígidos e o modelo 5 como flexível. O modelo 4 não se encaixa dentro dos limites apresentados pela norma, sendo um comportamento intermediário entre rígido e flexível, sendo classificado como semirrígido. Na figura 3 são apresentados a deformação de todos os cinco modelos.

Figura 3. Deformações totais dos modelos 1, 2, 3, 4 e 5 (escala aumentada cinco vezes).

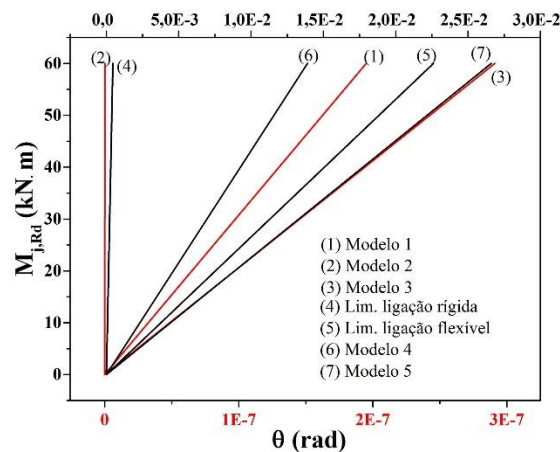


Analisando a figura 3 percebe-se que o carregamento aplicado causou deformação na estrutura, e nos pontos de transmissão de esforços (ligação entre viga e pilar) houve mudança no ângulo entre pilar e viga. Para a determinação da rigidez das ligações foi utilizada a rotação relativa entre viga e pilar.

Os modelos 1, 2, 3 e 4 têm enrijecedores de alma no pilar, os cálculos realizados no dimensionamento da estrutura apontam que não há necessidade de utilizá-los, porém optou-se por mantê-los nos 4 primeiros modelos a fim de reduzir a deformação da alma do pilar e evitar possíveis problemas causados por deformação excessiva.

A partir das análises dos modelos 1 a 5, pode-se verificar que as variações geométricas dos componentes desta ligação (diâmetro dos parafusos, espessura das talas da mesa da viga, quantidade de parafusos nas talas da alma da viga, tamanho das talas da mesa da viga) influenciam consideravelmente no valor de rigidez das ligações. Tal comportamento pode ser verificado na figura 4, em que se apresenta a variação do valor de rigidez rotacional para cada modelo em comparação aos limites de classificação da norma NBR 8800 (2008).

Figura 4. Curva momento-rotação dos modelos 1, 2, 3, 4 e 5 (modelos 1, 2 e 3 indicados em vermelho seguem a escala inferior, e os demais modelos e limites indicados em preto, seguem a escala superior).



CONCLUSÃO

As variações feitas no modelo causaram mudança significativa na rigidez da ligação. Dos 5 modelos apresentados neste trabalho, apenas 4 encaixam-se dentro dos limites de classificação proposta pela NBR 8800 (2008), e um dos modelos encontra-se entre os valores limites apresentados, sendo classificado como semirrígido.

As ligações 1, 2 e 3 foram classificadas como rígidas, logo, é possível afirmar que pode ser considerada a transmissão total do momento fletor da viga para o pilar (segundo a definição de ligação rígida). O modelo 4 foi classificado como semirrígido, ou seja, haverá transmissão parcial do

momento fletor da viga para o pilar; e o modelo 5 foi classificado como flexível, podendo, então, ser considerado que não há transmissão de momentos entre a viga e o pilar na análise estrutural.

REFERÊNCIAS

- Ansys Inc. ANSYS(R) Product Launcher Release 13.0. Ansys 13.0 Help, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- Barbosa, G. D. Influência da flexibilidade das ligações no projeto de estruturas metálicas. 2006. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Chan, S.L.; Chui, P.P.T. Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Elsevier, Amsterdam, 2000.
- Chen, W.-F.; Goto, Y.; Liew, J. Y. R. Stability design of semi-rigid frames. 1a edição ed. Nova York: Wiley-Interscience, 1995.
- Fang, C.; Izzudin. B.A.; Elghazouli. A.Y.; Nethercot D. A. Modeling of semi-rigid beam-to-column steel joints under extreme loading. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. v. 7(3), p. 245–263, 2013.
- Higaki, B. E. Contribuição à análise estrutural de edifícios de aço com ênfase nas ligações semi-rígidas. 2014. 278p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Maggi, Y. I. Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida. 2004. 269p. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- OnShape Inc. Software company. Cambridge, 2016.
- Queiroz, G.; Vilela, P. M. L.. Ligações, regiões nodais e fadiga de estruturas de aço. 1. ed. Belo Horizonte: IDM Composição e Arte Ltda., 2012. v. 1. 214p.
- Ramires, F. B. Contribuição das componentes mistas em ligações semi-rígidas. 2010. 300p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Santo, L. B. Influência da Rigidez das Ligações em Estruturas de Aço. 1998. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP.