



ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RIGIDEZ EM LIGAÇÕES PARAFUSADAS DE AÇO

Parametric Analysis of Stiffness in Steel Bolted Connections

Fabricio Rosado Urquhart⁽¹⁾; Silvia Corbani⁽²⁾

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

Dr. Prof., Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

Email para Correspondência: fabriliv@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: As ligações parafusadas de aço vêm ganhando espaço em ambientes estruturais, tendo em vista a agilidade de construção e montagem, assim como a dificuldade de utilização de solda de campo, em ambientes agressivos ou áreas classificadas. Na literatura e em normas, as ligações entre viga e pilar são consideradas como ligações rígidas ou flexíveis. Entretanto, raramente hipóteses de ligações rígidas ou flexíveis são adequadas para representar o problema, que depende dos componentes utilizados em projeto como a espessura da chapa de extremidade, diâmetros e distância entre parafusos. Uma hipótese mais realista do problema é assumir que estas ligações são semirrígidas. Como a rigidez nestas ligações é desconhecida e depende dos componentes utilizados em projeto citados anteriormente, no presente trabalho é realizado um estudo paramétrico em uma ligação viga-pilar de um pórtico de aço, composta por chapa de extremidade e parafusos. A partir de análises numéricas, a rigidez desta ligação é avaliada utilizando diferentes parâmetros dos componentes. Para se conhecer os esforços internos nas proximidades de uma ligação viga-pilar, modela-se um pórtico de aço composto por uma viga em balanço, conectada a um pilar. As análises numéricas tridimensionais são feitas em um programa de elementos finitos, o programa Ansys. Foi avaliado se as ligações parafusadas apresentam comportamento semirrígido, conforme critérios existentes no Eurocode-3 (2010), e será avaliada a influência destes parâmetros na rigidez das ligações. Nesta análise paramétrica, observou-se que a espessura de chapa de extremidade possui maior impacto na rigidez das ligações parafusadas de aço do que os diâmetros de parafusos.

Palavras chaves: *Estruturas em aço, ligações parafusadas, elementos finitos, ligações semirrígidas.*

Abstract: The bolted steel connections have been gaining space in structural environments, due to the agility of construction and assembly, as well as the difficulty of using field welding in aggressive environments or classified areas. In literature and in standards, column-beam connections are considered as rigid or flexible connections. However, rarely hypotheses of rigid or flexible connections are adequate to represent the problem, which depends on the components used in design as end plate thicknesses, bolts diameters and location. A more realistic hypothesis of the problem is to assume that these connections are semi-rigid. Because the stiffness in these connections is unknown and depends on the components cited previously, in present work a parametric study is carried out in a column-beam's connection of a steel frame, composed by end plate and bolts. From numerical analysis, the stiffness of this



connection is evaluated using different parameters of bolt diameter and end plate thickness. In order to know the internal forces in regions near of a beam-column connection, the steel frame composed of a beam connected to a column is modeled. The three-dimensional numerical analysis is done in finite element software, the Ansys software. It was evaluated if the bolted connections present semi-rigid behavior, according to the existing criteria in Eurocode-3 (2010) and will be evaluated the influence of this parameters in the connection stiffness. In this parametric analysis, it was observed that the end plate thickness has more impact on the stiffness of steel bolted connection than the bolt diameters.

Keywords: steel structures, bolted connections, finite elements, semi-rigid connections.

1 INTRODUÇÃO

Em projetos e análises de estruturas de aço, dois casos extremos de ligações são idealizados. Um deles é chamado de ligação rígida, enquanto o outro é classificado como ligação flexível. Ambos os conceitos raramente representam o comportamento real das ligações de estruturas de aço. Por isso é introduzido o conceito de ligações semirrígidas, o qual representa uma rigidez intermediária entre os casos extremos citados. Como principais modelos de ligações semirrígidas de estruturas de aço, as ligações parafusadas são altamente recomendadas em situações como ampliações de fábricas existentes, modificações em estruturas existentes próximas a tubulações em operação, ambientes altamente agressivos, entre outros. Atualmente, ligações parafusadas são muito utilizadas em pavilhões de indústrias onde se tem futuras montagens de equipamentos, permitindo assim a desmontagem e montagem da estrutura de aço da cobertura quando necessário.

Uma ligação em estruturas de aço pode ser feita com parafusos ou com soldas. Neste contexto, em projetos de estruturas de aço um projetista poderia optar por ligação parafusada para conceber uma ligação flexível, enquanto que a escolha por uma ligação soldada seria escolhida para definir uma ligação rígida. Entretanto, no final da década de 70, estudos de ligações parafusadas como Krishnamurthy (1979), mostraram que, dependendo da disposição dos parafusos, tem-se a formação de um binário de força, que pode tornar ligações parafusadas tanto flexíveis como ligações rígidas. Além disso, determinadas disposições de ligações parafusadas não podem ser classificadas como rígidas ou como flexíveis, surge então o termo ligações semirrígidas. O objetivo deste trabalho é analisar parametricamente ligações semirrígidas parafusadas.

A aplicação de análise paramétrica em estruturas de aço já foi investigada em Eldemerdash, Abu-Lebdeh & Al Nasra (2012). Entretanto, a distância entre parafusos analisada foi maior que a altura do perfil da viga, conforme ilustrado na Figura 1 (a). Neste trabalho, será analisada a ligação com uma linha de parafusos acima da mesa superior da viga, e outra linha de parafusos localizada acima da mesa inferior do perfil de aço, conforme ilustrado na Figura 1(b).

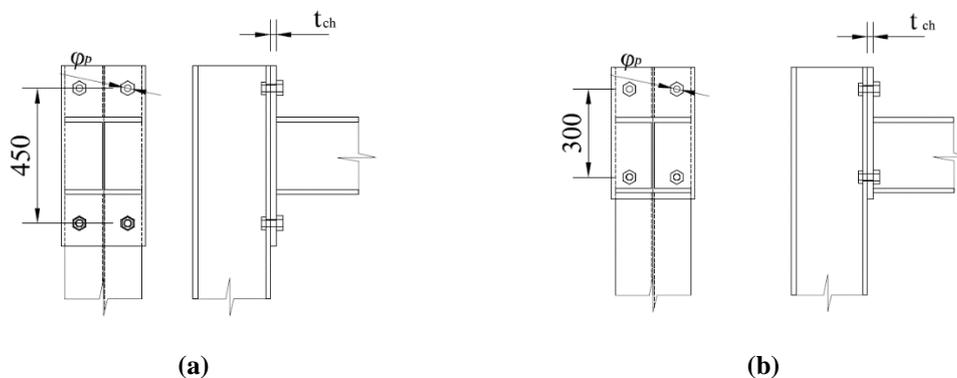


Figura 1 – Detalhes de ligações viga-pilar: (a) análise típicas e (b) estudo neste trabalho.

Este detalhe de ligação foi selecionado para mostrar que o braço de alavanca formado pelo binário de forças em ligações parafusadas depende da distância entre a posição da resultante das tensões de tração até a posição da resultante das tensões de compressão. A região sob tensões de compressão depende do contato entre a chapa de extremidade e a chapa da mesa do pilar e cabeça do parafuso e chapa. Enquanto que as tensões de tração ocorrem apenas nos parafusos. Dessa maneira, a análise de elementos finitos tridimensional é inserida modelando o problema de contato da ligação viga-pilar e não-linearidade física no programa *Ansys* (2010). Os resultados de momento versus rotação obtidos desta análise serão comparados com critérios estabelecidos no Eurocode-3 (2010) onde se tem a classificação das ligações em flexível, semirrígida e rígida. Diversos modelos serão estudados com diferentes diâmetros de parafuso, φ_p , e diferentes espessuras de chapa, t_{ch} . Com isso, será avaliada influência destes parâmetros na rigidez da ligação.

Na Figura 2, é ilustrado o pórtico que será analisado neste estudo. A ligação semirrígida é adotada para conectar uma viga em balanço ao pilar.

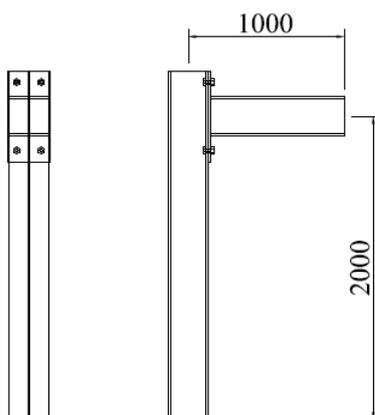


Figura 2 – Pórtico analisado (medidas em mm).

2 DISCRETIZAÇÃO DO PROBLEMA - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS (EF)

O pórtico estudado é composto por uma viga em balanço de comprimento 1m, fixada em um pilar, de mesmas propriedades da viga. A altura do pórtico é de 2m, medidos da face inferior do pilar até o eixo da viga. Na Figura 3, pode-se observar o modelo geométrico que foi utilizado durante a análise no programa *Ansys*.

O pilar foi considerado engastado na base, e na extremidade livre da viga foi aplicado um deslocamento, Δz . Além disso, para reduzir o número de elementos do modelo, assim como diminuir o tempo de processamento da estrutura, foi utilizado o conceito de planos de simetria.

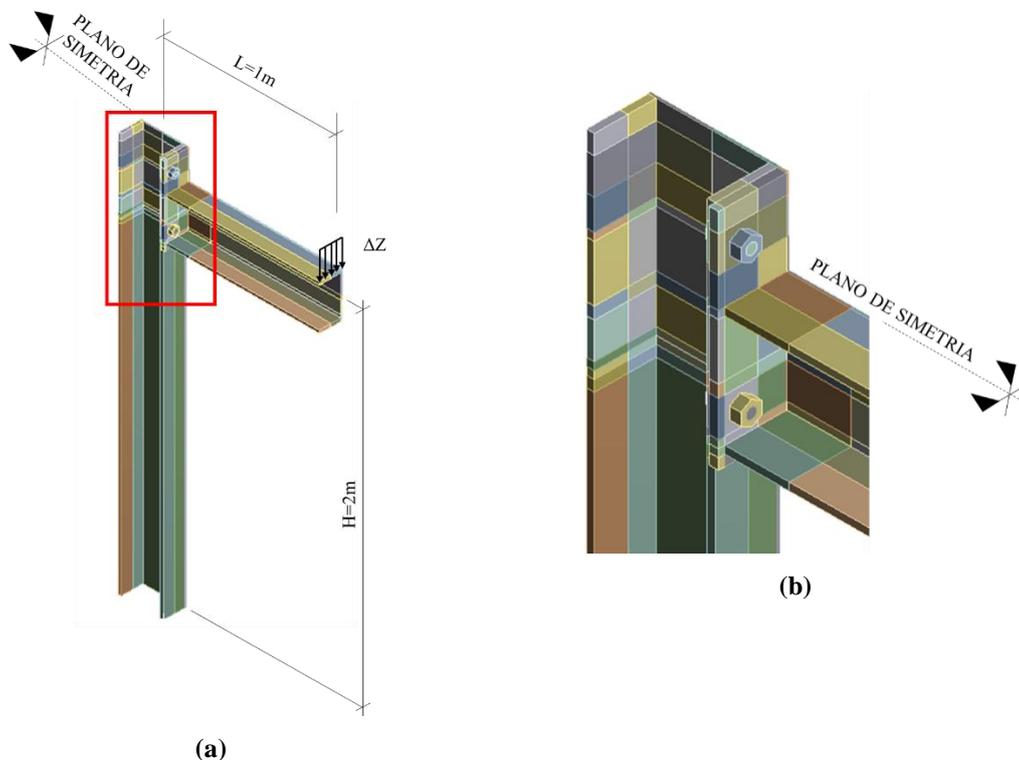


Figura 3 – Modelo estrutural analisado no Ansys:
(a) modelo 3D e (b) detalhe da ligação no modelo 3D.

2.1 Discretização do problema – malha de elementos finitos (EF)

A ligação parafusada de aço entre chapa de extremidade e mesa do pilar apresenta uma geometria simétrica e regular. Em adição, ocorrem regiões de concentração de tensões em torno do furo dos parafusos que demandam um melhor refinamento da malha. Assim, elementos hexaédricos com 20 nós (chamado no programa Ansys por *SOLID186*) foram usados por representarem adequadamente superfícies curvas em torno dos furos.

É previsível que sob um esforço solicitante ocorra contato ou afastamento entre os diferentes pares de superfícies: (i) superfície externa da chapa de extremidade e superfície externa da mesa do pilar (ver Figura 4(a)); (ii) superfície interna da chapa de extremidade e faces das porcas (Figura 4(b)); (iii) superfície interna da mesa do pilar e superfície inferior da cabeça dos parafusos (Figura 4(c)) e; (iiii) superfície dos furos e fuste dos parafusos (Figura 4(d)). Embora sejam previsíveis as superfícies que irão ocorrer contato, a solução exata do problema de contato é iterativa, que demanda um maior refinamento da malha para se ter a convergência do problema iterativo de contato. O Método Lagrangeano Aumentado foi usado. Nesta análise, as superfícies são adotadas igualmente deformáveis e verifica-se a convergência do contato avaliando os pares em contato, que no programa Ansys são definidas como contato simétrico e os

pares de superfície como *contact/target*. Foram definidas como *contact* as superfícies em vermelho na Figura 4, normalmente as chapas; e *target* para superfícies em azul na Figura 4, que estão relacionadas aos parafusos.

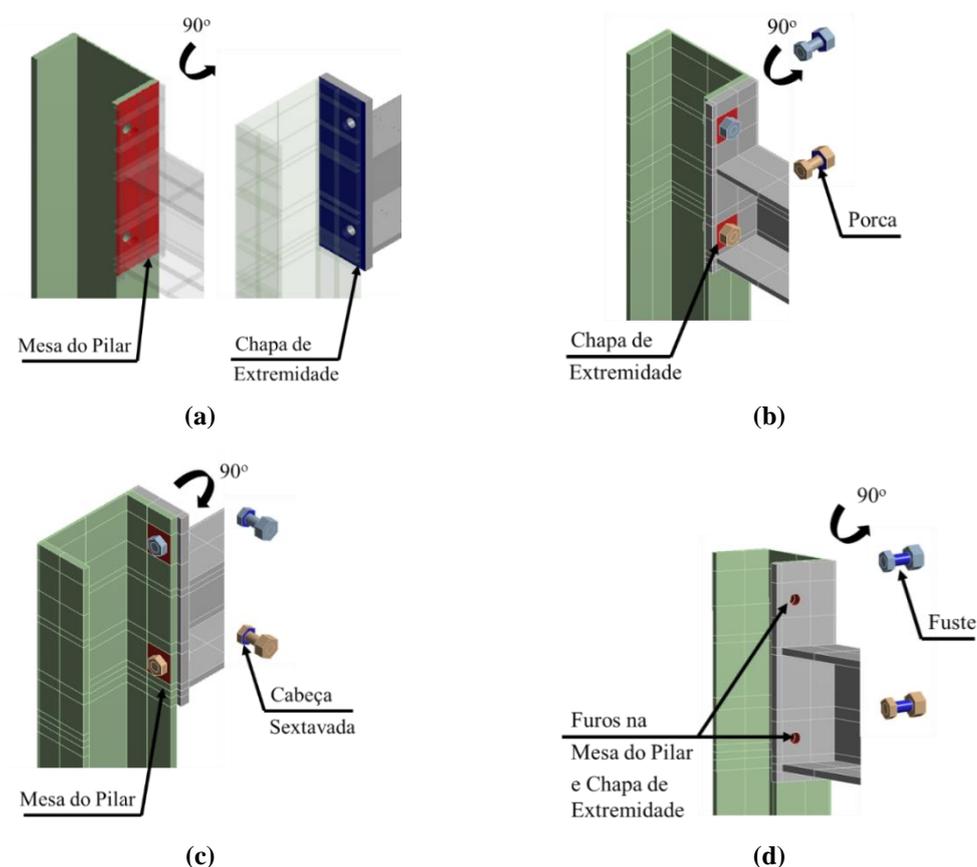


Figura 4 – Superfícies de contato: (a) chapa de extremidade/porca (b) mesa do pilar/cabeça do parafuso (c) chapa de extremidade/pilar e (d) em torno dos furos/fuste dos parafusos.

No programa Ansys, nos pares de superfícies devem ser definidos elementos de contato. Neste caso, os elementos CONTA174 e elementos TARGE170 foram atribuídos para cada par de superfícies em contato, eles consideram contato e deslizamento entre as superfícies dos elementos finitos sólidos. Os elementos CONTA174 são compostos por 8 nós, conforme Figura 5 (a), já os elementos TARGE170 são compostos por 3 nós, ver Figura 5(b).

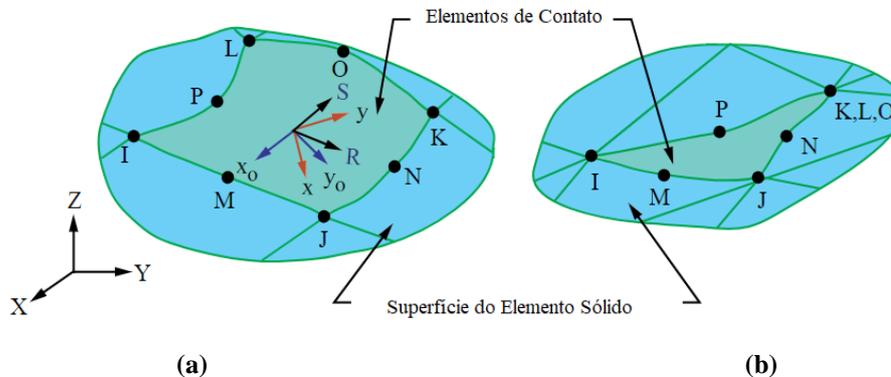


Figura 5 – Elementos finitos de Contato: (a) CONTA174 e (b) TARGE170.

Bursi & Jaspart (1998) recomendam pelo menos 3 camadas de elementos ao longo da espessura dos componentes em contato para uma chapa de extremidade. Dessa maneira, a malha da chapa de extremidade foi discretizada com 3 camadas de elementos ao longo da espessura e a malha da mesa do pilar foi discretizada com 4 camadas de elementos ao longo da espessura. Na Figura 6 é ilustrado o refinamento da malha na ligação. Na Figura 6 (a) pode-se observar o maior refinamento da malha em torno dos furos dos parafusos. Na Figura 6 (b) é ilustrado o refinamento da malha ao longo da espessura das chapas da mesa do pilar e de extremidade. Na Figura 6 (c) é mostrado o refinamento de malha uniforme no parafuso.

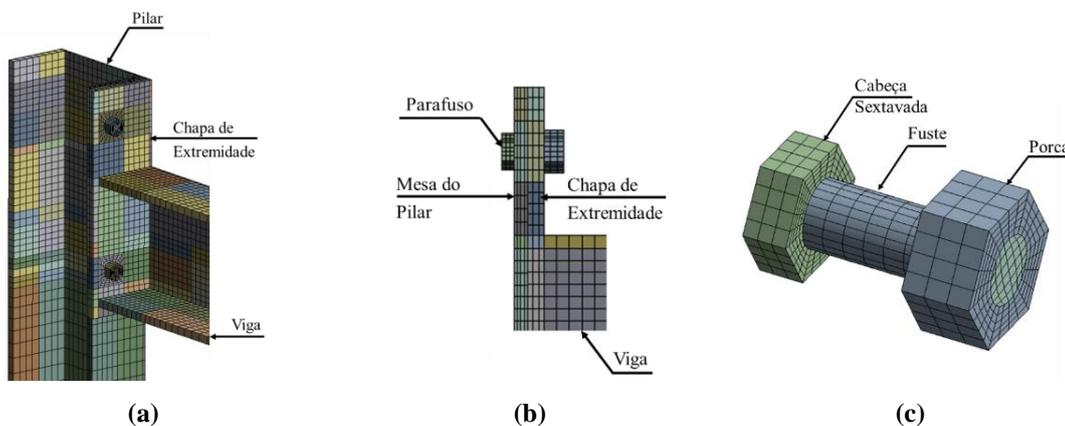
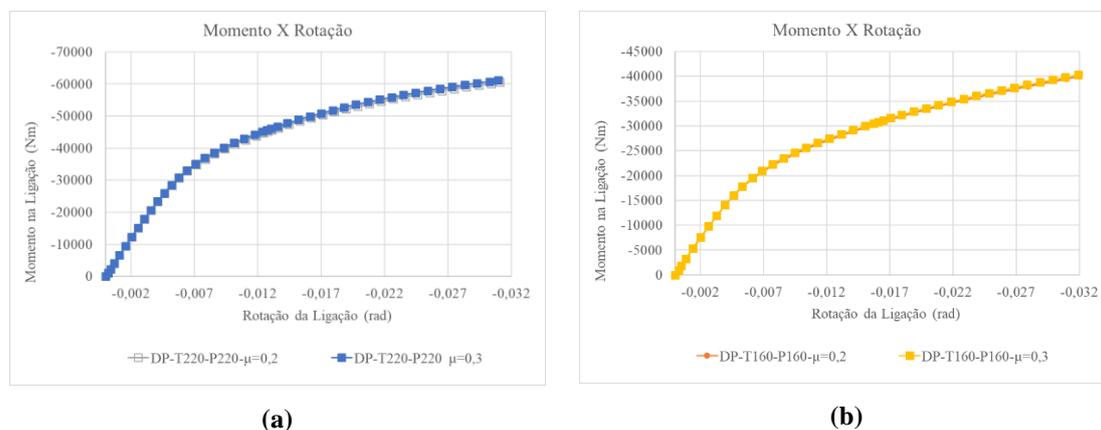


Figura 6 – Malha de EF: (a) modelo geral (b) vista superior (c) parafuso.

Na Figura 5 observam-se os eixos S e R que representam os eixos axiais dos elementos para atrito isotrópico, isto é, o mesmo coeficiente de atrito em ambas as direções. Os experimentos realizados por Gaertner e Bortoli (2006) resultaram pequenas variações de tensões apenas para coeficientes de atrito superiores que 0,3. Entretanto, o manual do programa Ansys recomenda um coeficiente de atrito máximo de 0,2, para valores acima, demanda de maior esforço computacional. Neste estudo, foi elaborada uma análise comparativa entre os resultados obtidos para coeficientes de atrito 0,2 e 0,3. Foram selecionados os modelos DP-T220-P220 e DP-T160-P160, os quais são,

respectivamente, o modelo com maior rigidez e o modelo mais flexível analisado neste trabalho.



(a) (b)
Figura 7 – Definição do coeficiente de atrito de contato:
(a) modelo DP-T220-P220 (b) modelo DP-T160-P160.

Na Figura 7 (a) e (b) são ilustradas as curvas momento vs. rotação para coeficientes de atrito 0,2 e 0,3 avaliados nos modelos DP-T220-P220 e DP-T160-P160, respectivamente. Em ambos os modelos, quando se alterou o coeficiente de atrito de 0,2 para 0,3, não houve alteração nos resultados, que está em concordância com o manual do programa Ansys. Dessa maneira, foi utilizado o coeficiente de atrito de 0,2 em todos os contatos analisados neste trabalho.

2.2 Análise não-linear física

Os aços ASTM A572 Grau 50 e aço ASTM A36 foram os materiais usados para os perfis e chapas, respectivamente. As curvas de tensão-deformação de engenharia destes materiais estão disponíveis em ASM International (2002). Nas análises deste trabalho, as curvas de tensão-deformação de engenharia foram transformadas em curvas reais de tensão-deformação. Para o material dos parafusos (ASTM A325), foi utilizada a curva de tensão-deformação de engenharia apresentada por Eldemerdash, Abu-Lebdeh & Al Nasra (2012). Adicionalmente, considerou-se o módulo de elasticidade do aço, E , igual a 210 GPa e coeficiente de Poisson, ν , igual a 0,3. Neste trabalho, todos os materiais foram adotados com comportamento com endurecimento isotrópico multilinear.

2.3 Estimativa da rotação na ligação viga-pilar

Estudos anteriores, conforme Bursi & Jaspart (1997), tratam o pilar com uma superfície rígida, com o objetivo da rigidez do pilar não influenciar na rotação da viga; porém neste estudo, optou-se pela avaliação da ligação parafusada com a influência de

todos os componentes. Como comentado anteriormente, deve-se resolver um problema de contato entre os diversos componentes na ligação. Em função disto, a relação momento vs. rotação para uma ligação semirrígida é não linear. Isto provoca uma irregularidade nos momentos relativos dos componentes. Dessa maneira, para um nó de um pórtico com ligação semirrígida, a rotação do nó é dada na Figura 8.

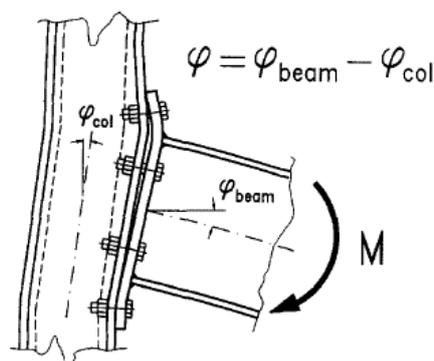


Figura 8 – Definição de rotação de um nó (Bursi & Jaspart, 1997).

Portanto, a medição da rotação do nó foi feita em função dos deslocamentos dos elementos no eixo dos componentes. Em função disso, a malha de elementos finitos foi gerada com a linha de eixo do pilar e da viga fixas em ambos os componentes.

2.4 Estimativa do momento resistente na ligação viga-pilar

O cálculo do momento transferido da viga para o pilar é calculado através do diagrama de momento fletor do pilar. Inicialmente calcula-se as reações na base do pilar, considerada engastada. A resultante do esforço de momento fletor na base pode variar dependendo da rigidez da conexão. Dessa maneira, o momento fletor na base é somado a reação horizontal multiplicada pela altura do pórtico. Isto é, quando a conexão é rígida, o momento na base do pilar é igual ao momento transferido da viga para o pilar. A medida que a rigidez diminui, este momento é reduzido. Portanto, a estimativa de momento resulta da equação (1).

$$M_{\text{ligação}} = M_{\text{base}} + R_h H \quad (1)$$

onde $M_{\text{ligação}}$ é o momento na ligação parafusada, H é a altura do pórtico (no caso, $H=2\text{m}$); e R_h é a reação horizontal na base do pilar.

2.5 Ligações parafusadas segundo o Eurocode

Em 1992, classificaram-se ligações parafusadas na norma EUROCODE-3 (1992). Esta norma foi à primeira norma a utilizar o comprimento real da viga para definir a

rigidez da ligação. Os efeitos da semirrigidez das ligações variam de estrutura contraventada ou não-contraventada.

Conforme EUROCODE (2010), em termos de rigidez, para a caracterização da ligação como articulada (flexível), é estabelecido o limite

$$S_{j3} = \frac{0,5EI}{L} \quad (2)$$

onde S_j é a rigidez rotacional secante da ligação, E é o módulo de elasticidade do aço, I é o momento de inércia da viga e o comprimento da viga é L .

O limite inferior para caracterização da ligação como rígida para estruturas não contraventadas é

$$S_{j2} = \frac{25EI}{L} \quad (3)$$

Esta divisão é mostrada graficamente na Figura 9.

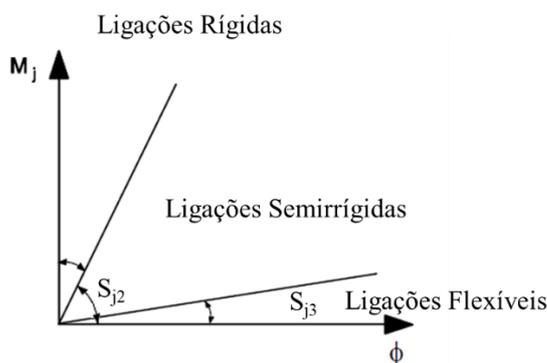


Figura 9 – Classificação da rigidez das ligações - Eurocode (2010).

3 ESTUDO PARAMÉTRICO

3.1 Dados do modelo

Na Figura 10 são apresentadas as dimensões usadas no modelo. A seção transversal dos pilares e vigas é W250x80. Conforme já descrito na seção 2.2, os parafusos de aço são ASTM A325 (tensão de escoamento e resistência a ruptura, 635 MPa e 825 MPa), os perfis são de aço ASTM A572 (tensão de escoamento de 345 MPa e resistência de ruptura de 450MPa) e as chapas de extremidade de aço ASTM A36 (tensão de escoamento de 250MPa e tensão de ruptura de 450 MPa).

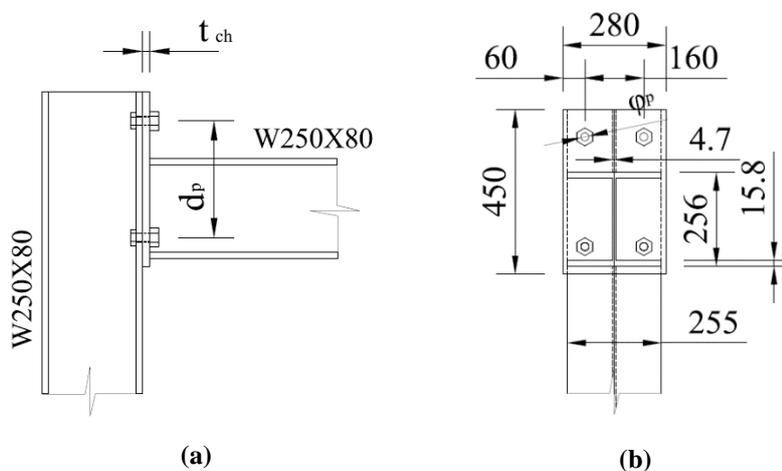


Figura 10 – Detalhe da ligação parafusada (a) corte (b) vista frontal.

Os parâmetros a serem analisados são diâmetro dos parafusos, ϕ_p , e espessura da chapa de extremidade, t_{ch} . A Tabela1 apresenta a identificação dos modelos analisados com os dados t_{ch} e ϕ_p usados em cada modelo.

A nomenclatura usada foi adotada conforme nomenclatura de protótipos experimentais em Maggi (2004). Neste estudo, a distância entre parafusos d_p foi considerada fixa e igual a 300 mm.

Tabela1. Parâmetros dos modelos.

| Modelo | t_{ch} (mm) | ϕ_p (mm) |
|--------------|---------------|---------------|
| DP-T160-P160 | 16,0 | 16,0 |
| DP-T160-P190 | 16,0 | 19,0 |
| DP-T160-P220 | 16,0 | 22,0 |
| DP-T190-P160 | 19,0 | 16,0 |
| DP-T190-P190 | 19,0 | 19,0 |
| DP-T190-P220 | 19,0 | 22,0 |
| DP-T220-P160 | 22,0 | 16,0 |
| DP-T220-P190 | 22,0 | 19,0 |
| DP-T220-P220 | 22,0 | 22,0 |

3.2 Resultados

Conforme apresentado na Figura 11, observa-se que a curva momento vs. rotação está contida na região classificada como ligações semirrígidas segundo o Eurocode, exceto para os modelos analisados com espessura de chapa t_{ch} de 16mm. Para esforços elevados, a ligações analisadas com $t_{ch}=16\text{mm}$ passam a se comportar como ligações flexíveis.

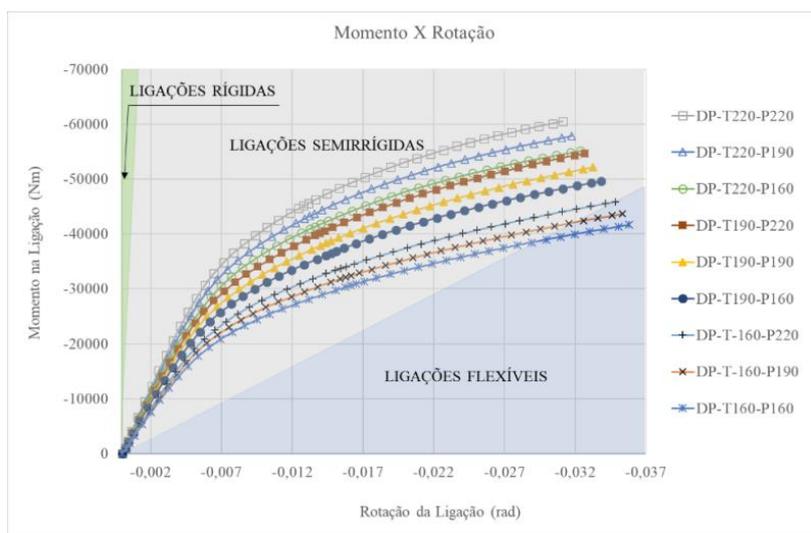


Figura 11 – Gráfico comparativo geral.

Para analisar o parâmetro com maior impacto na rigidez das ligações parafusadas, na Figura 12 apresenta-se as curvas momento vs. rotação para chapa de extremidade com espessura, t_{ch} , 22mm e 16mm. Observa-se que a redução da espessura da chapa torna a ligação parafusada mais flexível do que a redução do diâmetro dos parafusos ϕ_p . Para estes dados analisados, o parâmetro espessura de chapa de extremidade possui maior impacto na rigidez das ligações do que diâmetro dos parafusos.

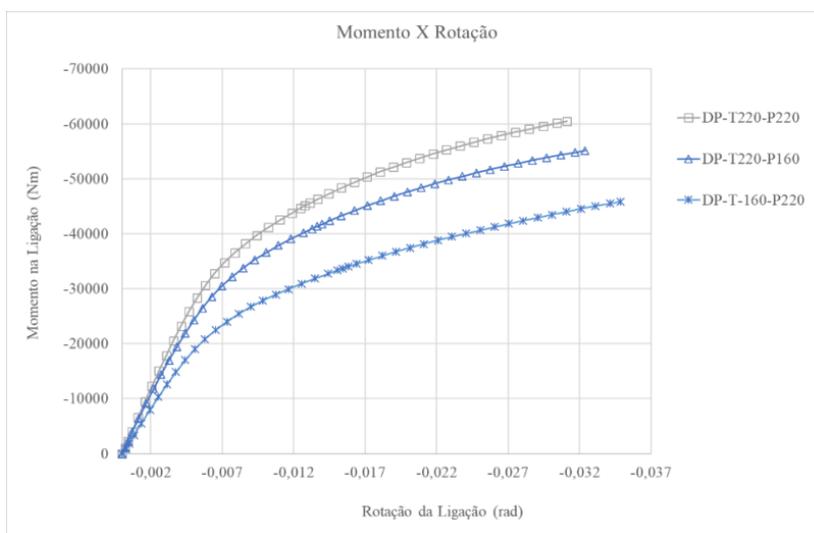


Figura 12 – Comparação entre os parâmetros t_{ch} e ϕ_p .



4 CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, analisou-se a influência dos parâmetros na rigidez das ligações parafusadas através de uma modelagem tridimensional. Adicionalmente, obteve-se a classificação da ligação, conforme sua rigidez, baseada na sugestão do Eurocode (2010). Concluiu-se que, a classificação do Eurocode, a qual separa as ligações em flexíveis, semirrígidas e rígidas, ainda é uma solução prática a ser utilizada. Em paralelo, através de trabalhos como este, sugerem-se melhorias, e até mesmo economias, como por exemplo, a redução de diâmetro de parafusos, ocasionando menor impacto na rigidez das ligações parafusadas de aço.

Os trabalhos futuros a partir deste trabalho podem se dar através da variação de demais parâmetros da ligação, como distância entre parafusos, aumentar número de linhas de parafuso a tração, ou outras análises como acréscimo de enrijecedores no pilar e a consideração da solda entre os componentes da ligação.



REFERÊNCIAS

ANSYS(2010), User's Guide, ANSYS Inc.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800-08**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASM International (2002) *Atlas of Stress-Strain Curves*. 2ª Edição, United States of America.

Bellei, I., H. (2000) **Edifícios Industriais em aço, Projeto e cálculo**. Editora Pini, São Paulo.

Bursi, S., O., & Jaspart, P., J. (1997) Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections. *J. Construct. Steel Res.* Vol. 44, No. 3, pp. 225-262.

Eldemerdash, M., Abu-Lebdeh, T. & Al Nasra, M. (2012) Finite Element Analysis of Large Capacity Endplate Steel Connections. *Journal of Computer Science*. Vol. 8, No. 4, pp. 482-493.

Eurocode-3, DIN EN 1993-1-8, *Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints* (includes Corridendum AC:2009), 2010.

Eurocode-3, ENV 1993-1-1, *Design of steel structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings*, European Committee for Standardization (CEN), 1992.

Gaertner, E. S., & de Bortoli M.G.D. (2006) Some Aspects for the Simulation of a Nonlinear Problem with Plasticity and Contact. *In: Ansys International Conference*.

KRISHNAMURTHY, N. (1979) *Experimental investigation of bolted stiffened tee-stubs*. Vanderbilt, Tennessee, Vanderbilt University. Report n. CEMBMA-1902-2.

Maggi, Y., I. (2000) **Análise numérica, via M.E.F, do comportamento de ligações parafusadas viga-coluna com chapa de topo**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Selamet, S., & Garlock, M. (2010) Guidelines for Modeling Three Dimensional Structural Connection Models Using Finite Element Methods. *In: International Symposium “Steel Structures: Culture & Sustainability”*. Istanbul, Turquia.