X CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
9 a 11 de maio - Rio de Janeiro
2018 XCBPE

Estudo Comparativo Entre Ligações Parafusadas e Soldadas em Estruturas Metálicas

Leandro Pantoja Paranhos[1], André Luís da Silva Batista[2], Gabriella Darold Vieira[3], Pedro Henrique Gama Neiva[4], Plínio Glauber Carvalho dos Prazeres[5]

[1] Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / leandroparanhos1@globo.com
[2]Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / andrebatista.ufpa@gmail.com
[3]Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / gabriella_darold@hotmail.com
[4]Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / bending.ufpa@gmail.com
[5]Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / plinio@ufpa.br

Resumo

As ligações têm como papel realizar a transmissão dos esforços atuantes em um elemento da estrutura para outro, de modo a garantir a segurança e conforto na utilização através dos estados limites últimos e de serviço, conforme previsto em norma. Os dois tipos mais comuns de ligações empregadas em estruturas metálicas são as ligações soldadas e as parafusadas. A escolha do tipo de ligação a ser utilizada em determinada estrutura pode tornar a execução mais rápida e a obra mais econômica. Alguns aspectos devem ser avaliados no momento da escolha do tipo de ligação empregada em uma estrutura metálica, tais como o local de montagem da estrutura, a infraestrutura disponível para a realização destas ligações e o grau de dificuldade de fabricação e montagem da peça. Diante do exposto, este artigo tem como objetivo comparar uma ligação parafusada com uma soldada por meio dos resultados da resposta estrutural obtidos na análise computacional realizada no *software IDEA StatiCa Connection*. Para efetuar a comparação, foram dimensionadas duas configurações para a mesma ligação viga-pilar, do tipo dupla cantoneira de alma: uma completamente soldada (1) e outra completamente parafusada (2). Pôde-se observar que para a ligação estudada, o modelo completamente soldado esteve um pouco mais próximo de falhar do que o parafusado. Entretanto, essa diferença foi quase irrisória, o que mostra que os outros parâmetros citados, além dos estruturais, devem ser levados em consideração na escolha do melhor tipo de ligação para determinada estrutura. Além disso, é possível concluir que as ligações apresentam o comportamento flexível, tal qual idealizado para esse tipo de ligação, sendo a configuração completamente parafusada ligeiramente mais flexível e apresentou uma capacidade de rotação consideravelmente maior que a soldada.

Palavras-chave

Ligações em Estruturas Metálicas; Ligações Parafusadas; Ligações Soldadas; Ligação com Dupla Cantoneira de Alma; Modelagem Computacional; *IDEA StatiCa Connection*.

Introdução

Para PFEIL (2009), o conector é um meio de união que trabalha através de furos feitos nas chapas. Em estruturas usuais, encontram-se os seguintes tipos de conectores: rebites, parafusos comuns e parafusos de alta resistência. Outra maneira de se conectar peças estruturais é através da ligação por soldagem. Atualmente, para a construção dos mais diversos tipos de elementos estruturais se utiliza basicamente dois tipos de conexões, as soldadas e as parafusadas.

As ligações têm como papel realizar a transmissão dos esforços atuantes em um elemento da estrutura para outro, de modo a garantir a segurança e conforto na utilização através dos estados limites últimos e de serviço, conforme previsto em norma. A escolha do tipo de ligação a ser utilizada em determinada estrutura pode tornar a execução mais rápida e a obra mais econômica. Alguns aspectos devem ser avaliados no momento da escolha do tipo de ligação empregada em uma estrutura metálica, tais como o local de montagem da estrutura, a infraestrutura disponível para a realização destas ligações e o grau de dificuldade de fabricação e montagem da peça.

Com base no exposto, o presente trabalho teve como principal objetivo realizar a comparação entre uma ligação soldada e uma parafusada por meio de análise computacional através de *software IDEA StatiCa Connection*, de modo a avaliar se existem parâmetros referentes ao comportamento mecânico das ligações que possam influenciar na escolha entre uma ligação soldada e uma parafusada.

Ligação viga-pilar com cantoneira dupla de alma

O funcionamento das estruturas compostas por peças pré-fabricadas conectadas, como é o caso de estruturas de aço, depende essencialmente do comportamento das ligações (PFEIL, 2009). Dessa forma, dois casos de ligações ideais merecem destaque, as ligações perfeitamente rígidas, que impedem a rotação entre viga e pilar, e as flexíveis, que permitem essa rotação relativa, como mostra a figura 1. Para a análise, neste trabalho foi utilizado a ligação do tipo viga-pilar com cantoneira dupla de alma, que, de acordo com SILVA *et al* (2016), é um exemplo de ligação usualmente considerada como flexível.

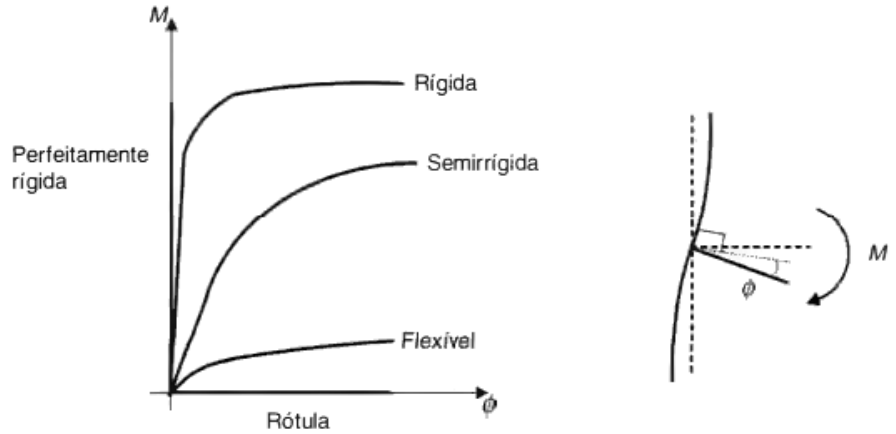


Figura 1 – Comportamento quanto à rigidez da ligação viga-pilar no gráfico momento-rotação (Pfeil, 2009).

A ligação com cantoneira dupla de alma é feita com duas cantoneiras responsáveis pela conexão da viga com o pilar, sendo que comumente as cantoneiras são soldadas, na fábrica, à alma da viga e parafusadas, na obra, à mesa do pilar, conforme exemplificado na Figura 2. Nesse tipo de ligação a rótula se encontra na face da mesa do pilar, de modo que há uma excentricidade entre a linha de atuação da reação e o centroide da linha de solda, e um momento torsor atuando na solda, sendo que este deve ser levado em consideração no dimensionamento.

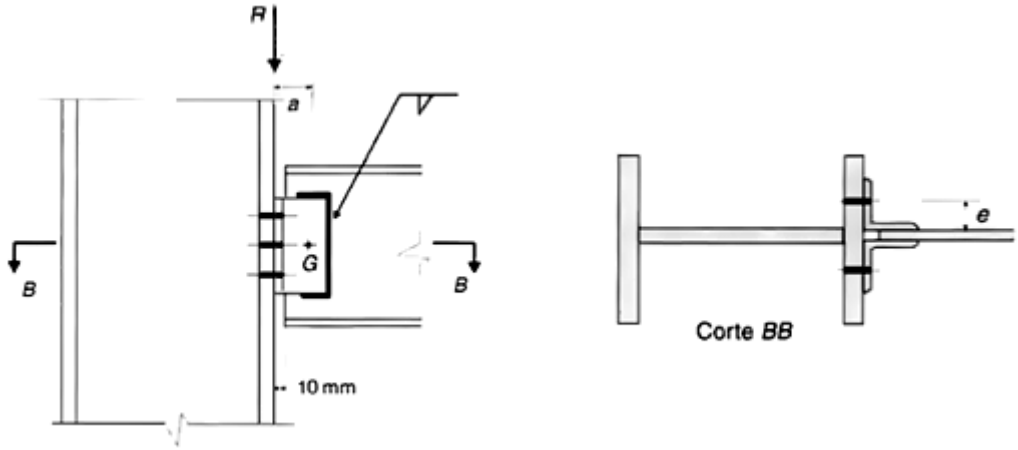


Figura 2 – Exemplo de uma ligação flexível do tipo dupla cantoneira de alma (Pfeil, 2009).

Existe também uma excentricidade entre a reação e a linha que intercepta os centroides dos parafusos, de modo que um momento é provocado, aumentando a solicitação, principalmente, nos parafusos das extremidades. Esses esforços adicionais nos parafusos mais solicitados devem ser calculados e somados vetorialmente às solicitações geradas apenas pelo esforço cortante, de maneira a se verificar quais os reais esforços atuantes nos parafusos mais exigidos.

Esse tipo de ligação é também conhecido como *Shear Connection*, pois, caso apresente o comportamento idealizado, apenas o esforço cisalhante é transmitido, sem o momento fletor. Na realidade, conforme os resultados obtidos por ASTANEH, NADER e MALIK (1989), ocorre certa transmissão de momento fletor, entretanto, este é tão pequeno que pode ser desprezado no projeto, podendo ser considerada apenas a transmissão do esforço cortante.

Como consequência da não transmissão de momentos, as ligações flexíveis permitem a rotação entre os elementos ligados, de modo que sua rigidez é considerada muito baixa. Ligações flexíveis são as que apresentam comportamento mais aproximado ao de uma rótula perfeita, caracterizada por não absorver nenhum momento, efetivamente.

Metodologia

A comparação feita no presente trabalho foi efetuada a partir do exercício 9.10.2, do livro *Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático Segundo a NBR 8800: 2008*

(PFEIL, 2009), em que se pede para dimensionar uma ligação com dupla cantoneira (76 x 9,1 kg/m) de alma entre uma viga (VS 450 x 51) e um pilar (CS 300 x 62), para resistir a um esforço cortante de projeto de 210 kN. Nesse exercício (Figura 3) as abas das cantoneiras são soldadas à alma da viga e parafusadas à mesa do pilar e todos os elementos metálicos foram confeccionados com aço A36.

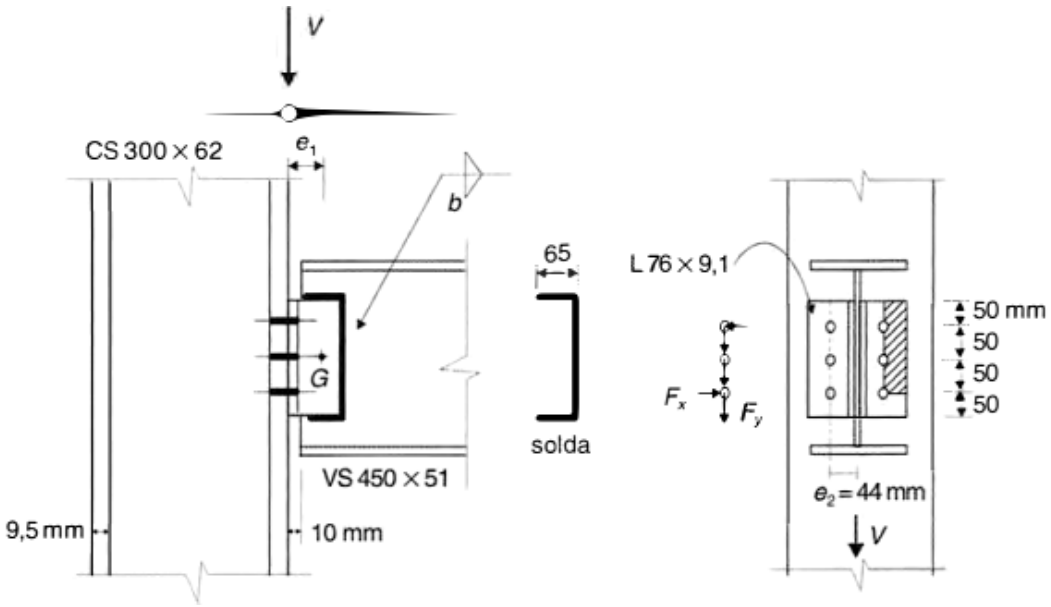


Figura 3 – Ligação viga-pilar do tipo dupla cantoneira de alma (Pfeil, 2009).

Contudo, aqui optou-se por dimensionar duas configurações diferentes para a mesma ligação apresentada no exercício: cantoneiras conectadas tanto à viga quanto à coluna por soldas (1) e por parafusos (2). A ideia, portanto, foi obter duas configurações diferentes para o mesmo tipo de ligação, mesmo esforço de projeto e mesmos perfis de viga, coluna e cantoneiras, sendo uma completamente soldada e outra parafusada, de modo a avaliar como responde estruturalmente a ligação para ambas as configurações.

Para a configuração (1) foram utilizadas soldas de filete com eletrodo E60, pernas de 5 mm e garganta de 3,5 mm, enquanto que para (2) foram utilizados parafusos A325 com diâmetro de 16 mm, sendo 4 utilizados para conectar as abas das cantoneiras à alma da viga e 4 em cada uma das abas conectadas à coluna, os espaçamentos entre os parafusos estão ilustrados na Figura 4; além disso, para a configuração (2) foram utilizadas cantoneiras de 250 mm de comprimento, enquanto que para (1) o comprimento era 200 mm. O dimensionamento das ligações foi feito baseado na norma brasileira NBR 8800: 2008, que trata do projeto de estruturas de aço.

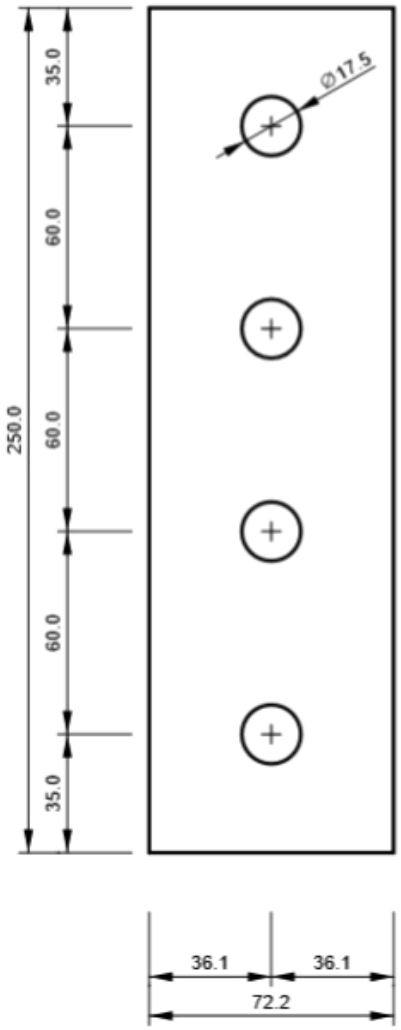
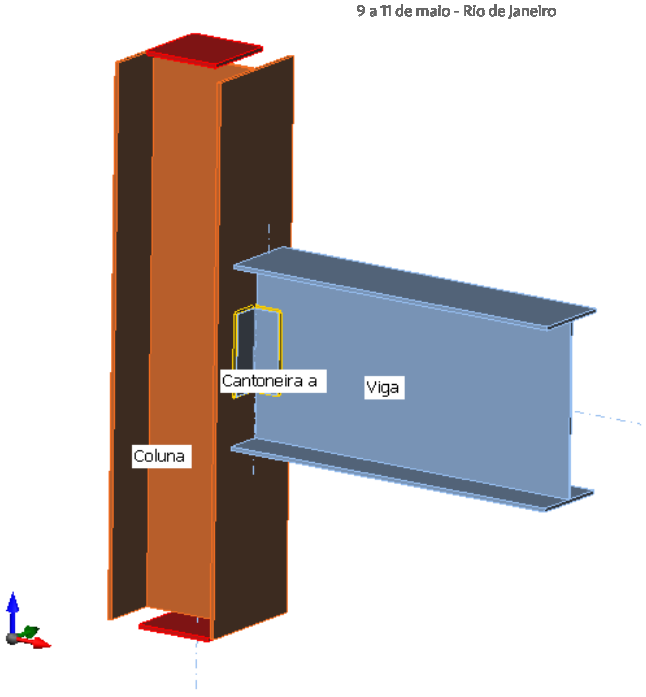
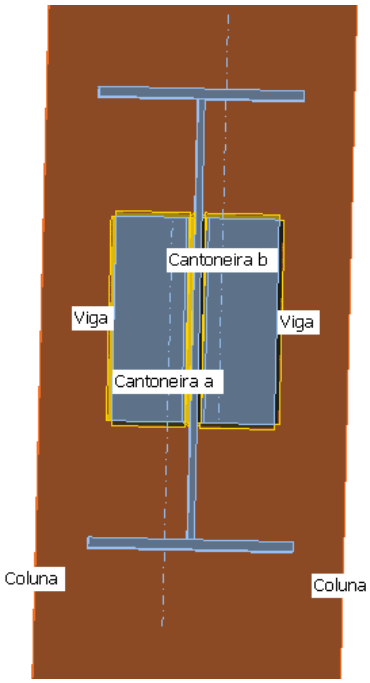


Figura 4 – Detalhamento das ligações parafusadas, com medidas em milímetros. O desenho foi gerado pelo programa após as análises.

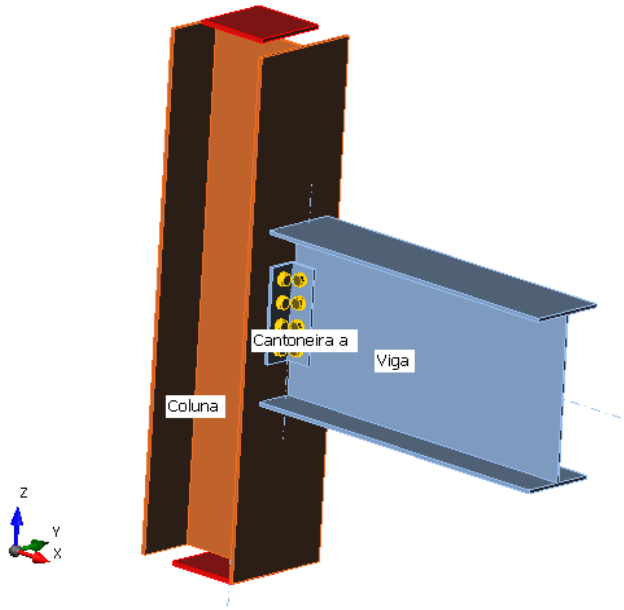
Após o dimensionamento da ligação para as duas configurações consideradas, foi feita a modelagem computacional de ambas em um programa de análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos, de modo a observar as respostas estruturais dos modelos em termos de tensões e deformações nas chapas dos perfis da viga, coluna e da cantoneira e nos parafusos e cordões de solda. Também foi feita uma análise do comportamento das ligações quanto à rigidez, de modo a verificar se ambas as configurações adotadas mantinham as características de uma ligação flexível.

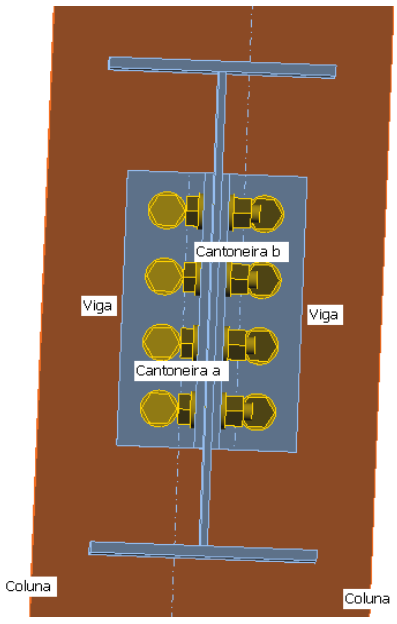
No presente trabalho foi utilizado como suporte para definir as ligações e analisá-las o *software IDEA StatiCa Connection*, que é um programa capaz de projetar ligações metálicas das mais variadas maneiras, entre elas, a ligação viga-pilar em estudo, e analisá-las por meio de modelagem computacional utilizando o processo de cálculo baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O *software* possui uma biblioteca com perfis estruturais metálicos, parafusos, soldas e *templates* de diversas formas de ligações em estruturas metálicas.





Figuras 5 e 6 – Vistas lateral e frontal, respectivamente, do modelo no *IDEA StatiCa Connection* da ligação viga-pilar do tipo dupla cantoneira de alma na configuração completamente soldada (1).

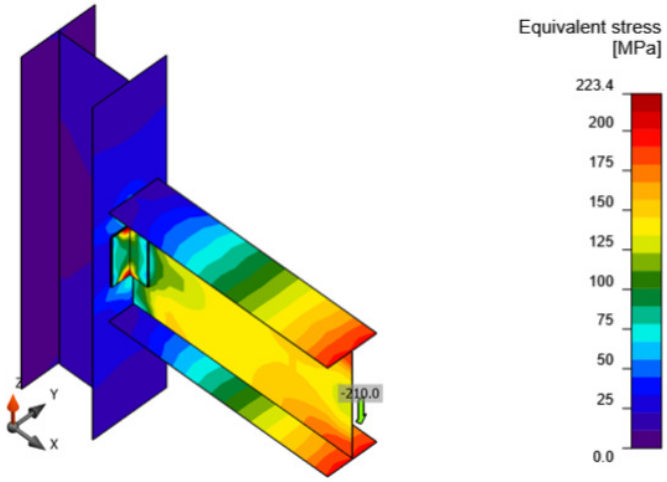




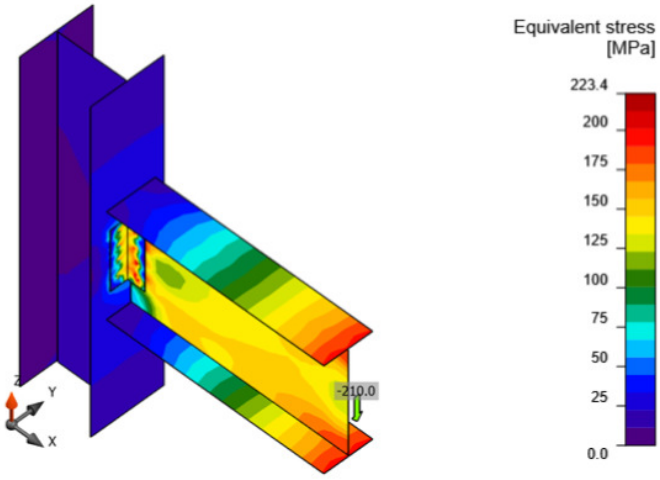
Figuras 7 e 8 – Vistas lateral e frontal, respectivamente, do modelo no *IDEA StatiCa Connection* da ligação viga-pilar do tipo dupla cantoneira de alma na configuração completamente parafusada (2).

Resultados e Discussões

Uma vez processadas as análises de tensão e deformação nos dois modelos, pôde-se observar, primeiramente, que em ambos não foi atingido nenhum modo de falha para o esforço cortante de projeto considerado (210 kN), de modo que o dimensionamento da ligação nas duas configurações pode ser considerado seguro quanto aos Estados Limites Últimos. Com isso, pode-se constatar também que não houve deformações plásticas nas chapas, visto que em nenhuma delas atingiu-se a tensão de escoamento do aço.



Figuras 9 – Mapa de tensões do modelo da ligação soldada no *IDEA StatiCa Connection*.



Figuras 10 – Mapa de tensões do modelo da ligação parafusada no *IDEA StatiCa Connection*.

Na Tabela 1 são apresentados os valores máximos de tensão e deformação registrados nas chapas de cada modelo. Pode-se notar que os valores de tensão são

menores nas chapas do modelo soldado, em relação ao parafusado, em geral. Essa diferença é acentuada nas chapas onde há presença de furos, no caso do modelo parafusado, de maneira que nas chapas onde estão os parafusos as tensões chegam a ser maiores na ordem de 10% a 15% do que no modelo soldado, chegando até a ser 90% maiores na mesa da coluna. Isso ocorre devido às chapas com furos terem a seção transversal reduzida, aumentando a tensão atuante.

Tabela 1 – Tensões e deformações máximas registradas nos modelos das ligações.

Elemento	Espessura (mm)	Ligação Soldada (1)		Ligação Parafusada (2)	
		Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (%)	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (%)
Mesa - Coluna	10	87.6	0.0	166.6	0.0
Alma - Coluna	8	33.6	0.0	37	0.0
Mesa Superior - Viga	10	194.2	0.0	194.3	0.0
Mesa Inferior - Viga	10	194.2	0.0	194.1	0.0
Alma - Viga	6	199.2	0.0	231	3.8
Aba da Cantoneira a - Coluna	8	203.1	0.0	223.6	0.1
Aba da Cantoneira a - Viga	8	223.5	0.1	223.5	0.0
Aba da Cantoneira b - Coluna	8	203.1	0.0	223.6	0.1
Aba da Cantoneira b - Viga	8	223.5	0.1	223.5	0.0

Por fim, é possível observar que os maiores valores de tensões e deformações nas chapas de ambos os modelos foi registrada na alma da viga e na sua seção líquida, conforme pode ser visualizado no mapa de tensões da Figura 10. Em relação aos esforços nos meios de ligação é importante destacar que o parafuso mais solicitado teve uma porcentagem de 93,5% em relação à utilização da sua resistência, enquanto que o trecho de solda mais solicitado atingiu 95% de utilização da resistência, o que implica que a ligação soldada esteve um pouco mais próxima de falhar do que a parafusada, embora tal diferença seja muito pequena. A porcentagem citada é obtida através da razão entre o esforço de projeto solicitante e a resistência.

A outra análise processada teve como objetivo avaliar o comportamento das ligações quanto à rigidez, para isso considerou-se a aplicação de um momento fletor de 5 kN.m na viga. As curvas momento-rotação para cada uma das ligações foram geradas pelo *software* e estão apresentadas nas figuras 11 e 12, para a ligação soldada e parafusada, respectivamente. Da análise das curvas é possível concluir que as ligações apresentam o comportamento flexível, tal qual idealizado para esse tipo de ligação,

caracterizado pelo registro de valores altos de rotação para pequenos valores de momento aplicado, o que se traduz em uma curva com uma inclinação muito suave.

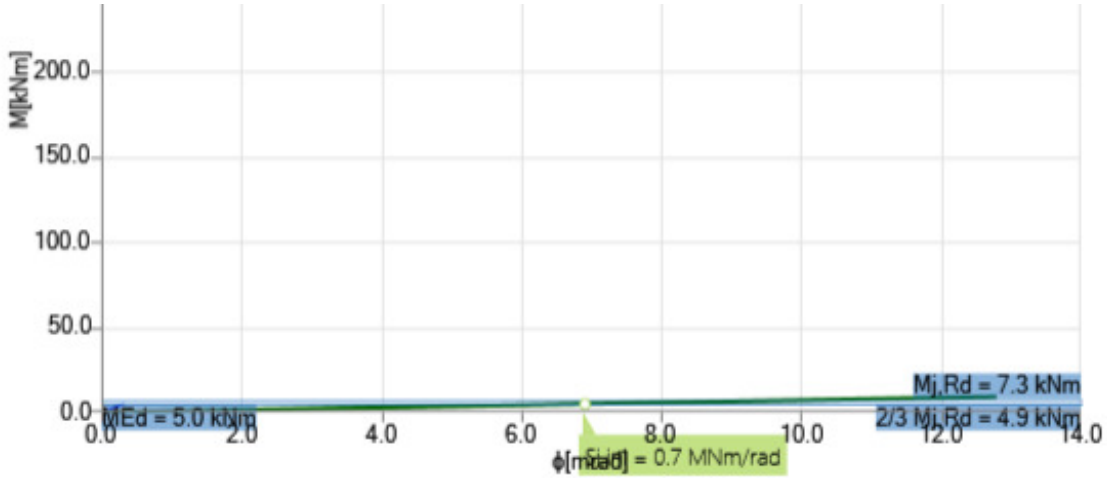


Figura 11 – Diagrama momento-rotação para ligação soldada.

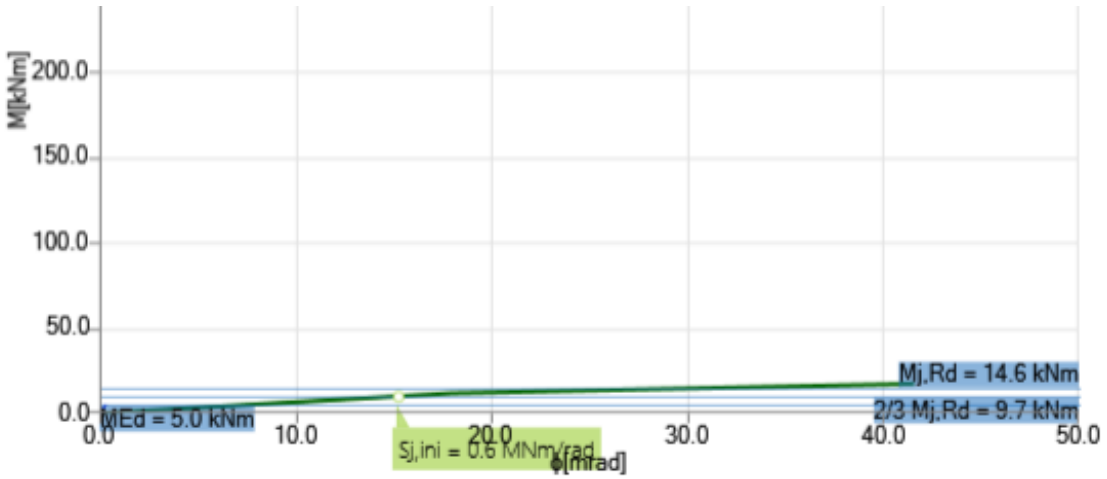


Figura 12 – Diagrama momento-rotação para ligação parafusada.

É possível observar que os valores de rigidez das ligações são praticamente iguais, sendo a ligação parafusada um pouco mais flexível (possui inclinação da curva mais suave). Nota-se também que a resistência da ligação parafusada ao momento fletor (14,6 kN.m) é maior que a da ligação soldada (7,3 kN.m), de modo que a ligação parafusada apresenta maior capacidade de rotação (41,6 miliradianos-mrad) do que a soldada (12,8 mrad). Uma outra informação que corrobora o que foi discutido acima diz respeito à rotação associada ao momento fletor aplicado (5 kN.m), que foi maior na ligação parafusada (7,7 mrad) do que na soldada (7,0 mrad).

Conclusões

Como já explanado, os dois tipos mais comuns de ligações empregadas em estruturas metálicas são as ligações soldadas e as parafusadas. Assim, o desenvolvimento do presente estudo ajuda no embasamento para a escolha do tipo de ligação a ser utilizada em determinada estrutura metálica, ao analisar a resposta estrutural de duas ligações metálicas similares, uma soldada e outra parafusada, após a modelagem computacional no *software IDEA Connection*.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que, para esse modelo de ligação, a ligação soldada esteve um pouco mais próxima de falhar do que a parafusada. Entretanto, essa diferença foi quase irrisória, o que mostra que outros parâmetros, como a infraestrutura disponível no local e o custo, além dos estruturais, devem ser levados em consideração na escolha do melhor tipo de ligação para determinada estrutura.

Um parâmetro de análise estrutural que pode ser levado em conta diz respeito às tensões e deformações nas chapas, em que foram observados valores mais altos nas ligações parafusadas, chegando a uma diferença de até 90% na mesa do pilar. Tais níveis de tensão foram registrados nas chapas das ligações parafusadas, na região onde se encontram os parafusos, o que se explica pela redução da seção transversal pela presença dos furos, o que provoca um aumento nas tensões.

Além disso, a ligação viga-pilar utilizada, tanto para as soldadas quanto para as parafusadas, foi considerada como flexível ideal, isto é, aquela em que não há transmissão de momento fletor ou essa transmissão é mínima, podendo ser desprezada. Esse comportamento pode ser observado e confirmado pelos diagramas momento-rotação apresentados, que mostram altos valores de rotação para pequenos valores de momento aplicado, sendo esses bem similares para ambas as ligações consideradas, com as ligações parafusadas ligeiramente mais flexíveis.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro.

ASTANEH, A.; NADER, M.N.; MALIK, L. (1989). Cyclic Behavior of Double Angle Connections. Journal of Structural Engineering, n. 115, p. 1101-1118.

PFEIL, W.; PFEIL, M. (2009). Estruturas de aço: dimensionamento prático. 8.ed. Rio de Janeiro, LTC.

SILVA, F.L.; GOEDEL, F.; PRAVIA, Z.M.C. (2016). Evaluation of Rotational Stiffness of BeamColumn Bolted Connection with Double Angles in Web. XXXVII South American Conference on Structural Engineering.