

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA LIGAÇÃO PARAFUSADA VIGA-PILAR DO TIPO CHAPA DE EXTREMIDADE AJUSTADA VIA ELEMENTOS FINITOS TRIDIMENSIONAIS

Nathalia Alves Dornellas Fonseca, nat_dornellas@hotmail.com¹

Gray Farias Moita, gray@dppg.cefetmg.br¹

Renata Gomes Lanna da Silva, rglanna.silva@gmail.com¹

Fabiano Eduardo Moraes Matos, fabianoemmatos@hotmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira - CEP 30510-000 - Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo: As ligações desempenham papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço, pois influenciam na distribuição dos esforços internos, nos deslocamentos e na estabilidade da estrutura. Na análise convencional de estruturas de aço admite-se o comportamento das ligações viga-pilar como idealmente rígida ou perfeitamente rotulada, com o intuito de simplificar os cálculos e de reduzir o tempo necessário para dimensionamento. No entanto, o comportamento da maioria das ligações se enquadra entre os dois casos extremos, sendo do tipo semirrígido. Deste modo, o entendimento do comportamento das ligações entre os elementos conectados é fundamental para análise e dimensionamento das estruturas de aço. Este artigo apresenta uma análise numérica do comportamento estrutural de uma ligação viga-pilar do tipo chapa de extremidade ajustada. A ligação é analisada pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o programa LUSAS. O objetivo é apresentar um estudo do comportamento de ligações semirrígidas com chapa de extremidade ajustada. É realizada uma análise não linear geométrica e do material via MEF para obter a curva momento $\times$ rotação relativa da ligação, e posteriormente, comparada com o resultado do ensaio experimental. Resultados interessantes são apresentados e comentados.

Palavras-chave: Estruturas de aço, Ligações semirrígidas, Método dos elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento de ligações entre os elementos estruturais é essencial para a análise e dimensionamento de uma estrutura, podendo influenciar nos aspectos econômicos, construtivos e principalmente nos estruturais. O comportamento global das estruturas de aço depende do comportamento das ligações, que por sua vez depende diretamente da interação entre os elementos e os meios que as compõem, assim como das características geométricas dos perfis conectados.

Embora o efeito das ligações semirrígidas viga-pilar no comportamento de pórticos de aço e seus benefícios sejam reconhecidos hoje em dia, muitas análises estruturais ainda consideram as ligações entre vigas e pilares como perfeitamente rígidas ou idealmente rotuladas. A ligação perfeitamente rígida conduz a uma continuidade rotacional entre os elementos estruturais conectados, fazendo com que o ângulo formado entre esses elementos permaneça o mesmo após a atuação do carregamento na estrutura, possibilitando a transmissão total do momento fletor. Já a ligação idealmente rotulada leva à condição de que nenhum momento é transmitido da viga para o pilar, presumindo que a rigidez da ligação é muito pequena se comparada à dos elementos conectados. No entanto, análises experimentais comprovam que as ligações se localizam em um estágio intermediário entre as condições de perfeitamente rígido e idealmente rotulado, assim as mesmas possuem um comportamento semirrígido, permitido a transmissão parcial do momento fletor e uma rotação relativa entre os elementos conectados.

As ligações semirrígidas influenciam na distribuição dos esforços da estrutura e na estabilidade global do pórtico, uma vez que o aumento do deslocamento lateral da estrutura acarreta uma redução de rigidez nas barras. Então, quando as ligações semirrígidas são consideradas, um aumento do deslocamento lateral pode ocorrer e, conseqüentemente, um aumento do efeito $P-\Delta$ é observado em relação à análise convencional com ligações idealmente rígidas. Assim, a não consideração do comportamento semirrígido das ligações pode conduzir a resultados inconsistentes e imprecisos da resistência e da estabilidade global das estruturas.

O comportamento não linear da ligação pode ser representado pela curva momento $\times$ rotação relativa ($M - \theta_r$), que, em geral, pode ser obtido por resultados de ensaios experimentais, modelos numéricos via MEF, método dos componentes e formulações analíticas. Na Figura 1 são apresentadas curvas momento $\times$ rotação relativa para vários tipos de ligações, relacionando o momento fletor aplicado com a rotação relativa da ligação. Pode-se observar que todos os tipos de ligações apresentam um comportamento situado entre os dois casos extremos de perfeitamente rígido e idealmente rotulado.

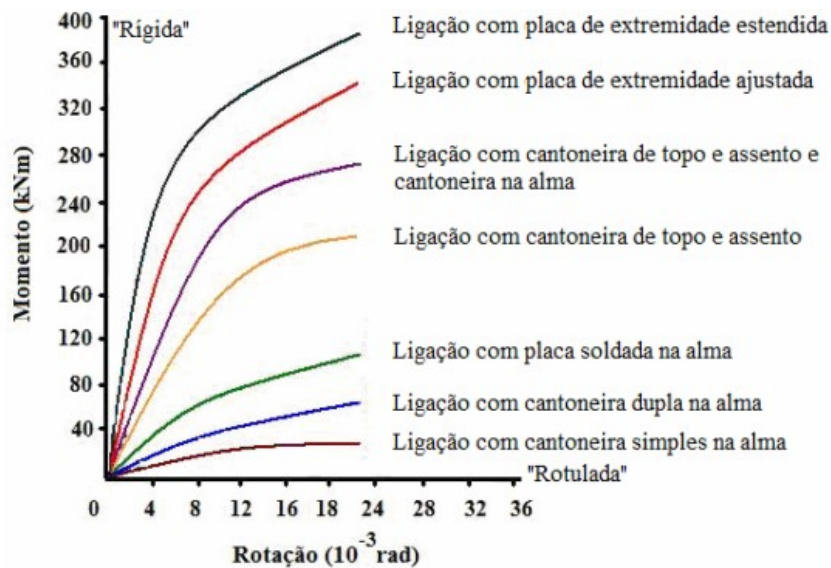


Figura 1. Curvas momento $\times$ rotação relativa para diversos tipos de ligação (Silva, 2010)

Devido à grande quantidade de parâmetros envolvidos na ligação (componentes e relações constitutivas de seus materiais), a modelagem numérica calibrada de acordo com a modelagem experimental tem se tornado mais adequada, permitindo o estudo da influência de todos os parâmetros, de uma forma mais econômica e também mais satisfatória ao desenvolvimento de modelos analíticos, além de possibilitar a análise de determinados efeitos que, por inacessibilidade da instrumentação ou por impossibilidade de monitoramento, não podem ser mensurados nas análises experimentais.

Durante os últimos 20 anos, estudos avançados via MEF tem sido realizado com ligações com chapas de extremidades com o objetivo de fornecer estimativas de rigidez, resistência e ductilidade para uma grande variedade de geometrias de ligação. Esses modelos em elementos finitos têm sido usados para desenvolver curvas momento $\times$ rotação relativa, para verificar metodologias de projeto baseadas no comportamento elastoplástico, para avaliar o comportamento localizado nos componentes da ligação, como parafusos e placas de extremidade, bem como avaliar as ligações em relação aos dois planos de flexão. Pode-se citar os estudos apresentados por Bose *et al.* (1997), Ribeiro (1998), Bergamasco (2012) e Oliveira (2015).

O objetivo deste artigo é apresentar uma análise numérica do comportamento estrutural de uma ligação semirrígida com chapa de extremidade ajustada. Para esse fim, será utilizado o MEF, com o auxílio do programa LUSAS, como uma ferramenta para obter o comportamento não linear da ligação. Os resultados foram calibrados e comparados com os resultados obtidos por Ostrander (1970).

2. ENSAIO EXPERIMENTAL REALIZADO POR OSTRANDER (1970)

A ligação viga-pilar com chapa de extremidade ajustada modelada neste trabalho, visando representar o seu comportamento e analisar uma gama de resultados, foi uma das ligações estudadas experimentalmente por Ostrander (1970).

Os protótipos ensaiados por Ostrander (1970) foram do tipo cruciforme, em que duas vigas foram ligadas a um pilar central. Esta configuração permite a aplicação do carregamento por meio de um único atuador hidráulico, posicionando-o sobre o pilar central, tendo-se dois apoios posicionados sob as extremidades das vigas. Os parâmetros da ligação adotados na modelagem são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. – Dimensões adotadas para o ensaio experimental (Ostrander, 1970)

Seção da viga	Seção do pilar	Chapa de topo			Parafusos	
		b (mm)	h (mm)	t (mm)	g (mm)	c (mm)
W310x38,7	W200x59,0	190,0	330,0	16,0	100,0	180,0

Na Tabela 1, b é a largura da chapa, h o comprimento da chapa, t a espessura da chapa, g a distância horizontal entre furos e c a distância vertical entre furos.

Os valores da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência a ruptura (f_u) dos aços dos perfis, das chapas e dos parafusos conforme Tabela 2. O módulo de elasticidade, E , é igual a 20.000 kN/cm². E, a força de protensão aplicada nos parafusos foi igual a 34,7 kN/parafuso.

Tabela 2. – Propriedades dos aços adotados no ensaio experimental (Ostrander, 1970)

Aços	f_y (kN/cm ²)	f_u (kN/cm ²)
USI CIVIL 300 (perfis laminados)	30,0	40,0
ASTM A36 (chapas)	25,0	41,0
ASTM A325 (parafusos)	63,5	82,5

3. MODELAGEM NUMÉRICA

Para a realização da análise numérica, inicialmente, foram selecionados os parâmetros principais da ligação, definindo a geometria do modelo (Figura 2 e Figura 3). Após a realização da análise numérica da ligação utilizando o programa computacional LUSAS, os resultados obtidos foram comparados com os resultados da modelagem experimental.

Os parâmetros principais que podem alterar o comportamento da ligação são: espessura da chapa de extremidade, diâmetro e quantidade dos parafusos, dimensões das vigas e pilares, distância entre parafusos, distância do parafuso a extremidade da chapa e presença ou não de enrijecedores na alma do pilar.

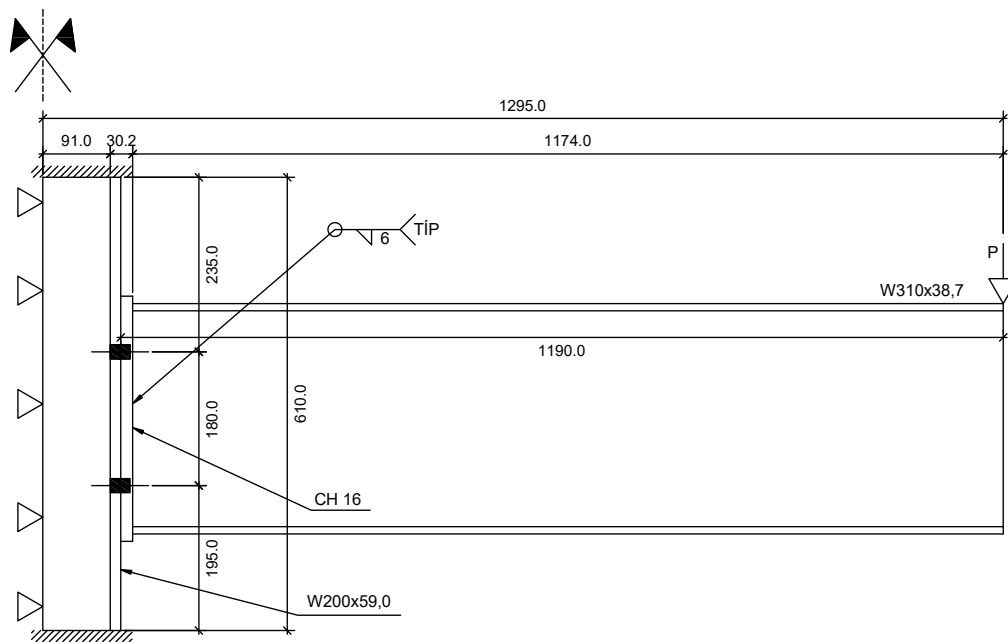


Figura 2. Geometria do modelo (Ostrander, 1970)

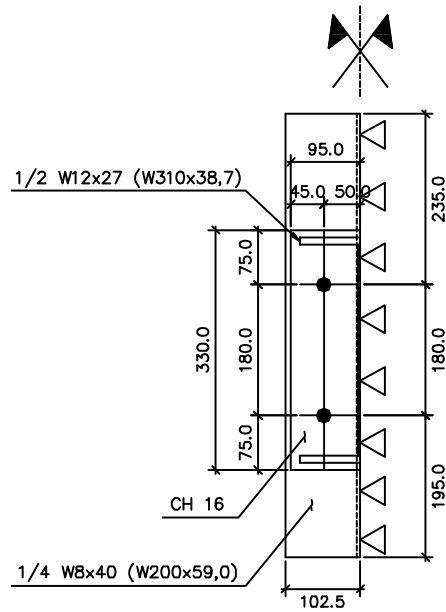


Figura 3. Geometria e gabarito da ligação (Ostrander, 1970)

3.1. Tipos de elementos

Para os elementos da mesa do pilar, das mesas da viga, da chapa de extremidade da ligação e dos parafusos, onde é necessária uma análise mais refinada, foram utilizados os elementos finitos sólidos HX8M (Fig. 4a) e PN6 (Fig. 4b). Para os elementos da alma do pilar e da alma da viga, foram utilizados os elementos finitos de casca QTS4 (Fig. 4c). Para o contato dos parafusos com a chapa de extremidade ajustada e a mesa do pilar, utilizou-se o elemento de junta JNT4 (Fig. 4d) na simulação.

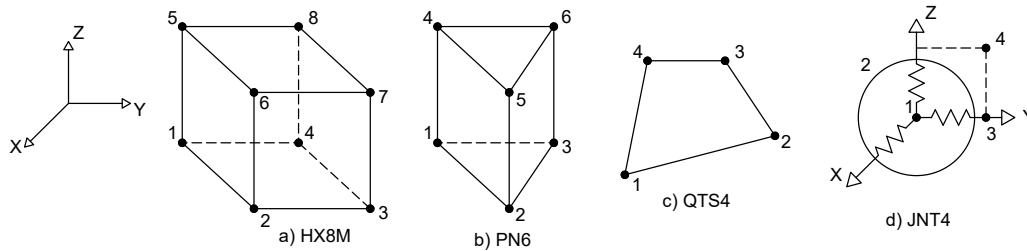


Figura 4. Elementos finitos adotados na modelagem numérica (Lusas, 2014)

3.2. Malha

Conforme preconizado no MEF, a discretização da malha deve-se ter um aspecto regular para que ocorra a distribuição de tensão de forma regular e com o tempo de análise razoável. A malha é refinada em áreas com grandes variações de tensões, onde são necessárias análises mais apuradas, como, por exemplo, na chapa de extremidade na região próxima dos furos dos parafusos. A Figura 5 apresenta o modelo discretizado.

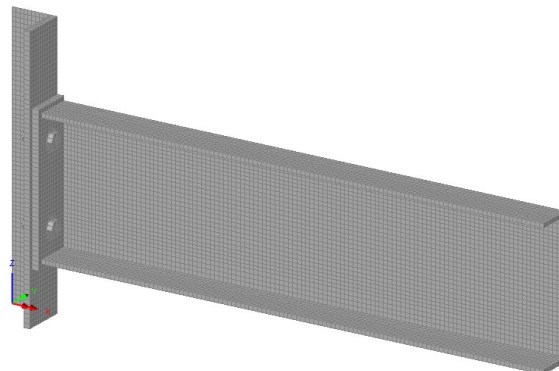


Figura 5. Malha de elementos finitos

3.3. Condições de contorno

As condições de contorno para os nós situados no plano de simetria da ligação foram impostas considerando o deslocamento nulo na direção Y (perpendicular ao plano de simetria). E, devido ao ensaio experimental ter sido realizado em protótipos do tipo cruciforme, foi possível realizar a simetria do modelo aplicando a condição de deslocamento nulo na direção X na metade da alma do pilar.

Para as condições de contorno de trabalho do modelo, a extremidade inferior do pilar é restringida nas direções X, Y e Z, e a extremidade superior do pilar é restringida nas direções X e Y.

Para simular o contato entre a mesa do pilar e a chapa de extremidade ajustada foram adotados pontos nodais coincidentes e aplicado o elemento *Slideline*. Este elemento de contato permite que os componentes da ligação se deformem de forma independente, impedindo que um elemento penetre no outro, possibilitando capturar o comportamento em cada interface da ligação.

A solda não foi modelada na ligação; para simular o seu comportamento, é considerado um único nó rígido interligando um elemento a outro.

3.4. Solicitações aplicadas

As forças aplicadas ao modelo são de natureza distinta, representadas pela solicitação produzida pelo peso próprio da estrutura, pela protensão dos parafusos e pela solicitação de momento fletor da viga. O carregamento devido ao peso próprio da estrutura é gerado automaticamente pelo programa. O carregamento devido à protensão dos parafusos é introduzido por meio de carga aplicada em um ponto nodal situado na extremidade da porca e o carregamento aplicado referente ao momento fletor da ligação é introduzido por meio de carga vertical concentrada em um ponto nodal situado na extremidade da viga.

3.5. Características e controle da análise numérica

A análise numérica envolve uma análise estática considerando as não linearidades do material e geométrica. Para a não linearidade geométrica, considera-se a Formulação Lagrangeana Total. O modelo elastoplástico com critério de plastificação de Von Mises é adotado para representar o material dos perfis da viga e do pilar, da chapa de extremidade ajustada e dos parafusos. Para a obtenção da solução, a cada etapa de carregamento, é utilizado o método de Newton-Raphson Puro, especificando-se o número máximo de iterações em cada etapa de carregamento e o número máximo de buscas lineares em cada iteração. O critério de convergência do programa pode ser realizado por meio do controle de carregamento ou controle de deslocamento.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos na análise numérica são comparados com os resultados do ensaio experimental de Ostrander (1970). Na Figura 6 pode-se comparar qualitativamente a deformada entre o protótipo ensaiado e análise numérica.

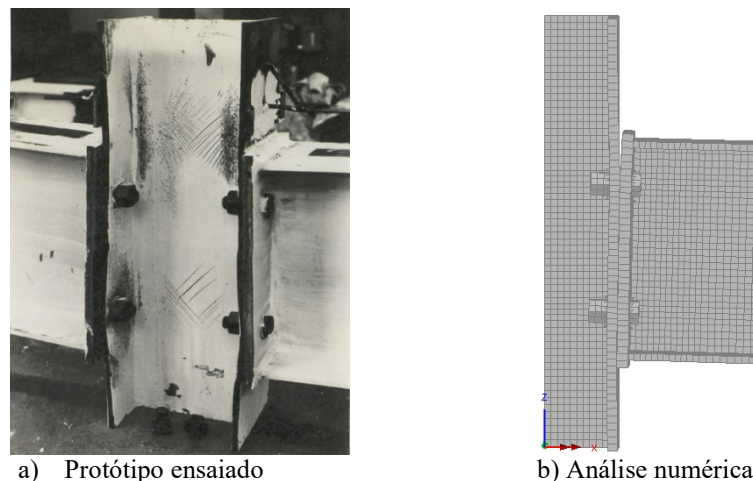


Figura 6. Comparação entre a deformada do ensaio experimental e numérico

4.1. Curva momento x rotação relativa e classificação

A obtenção da relação momento x rotação relativa para a ligação analisada numericamente é feita indiretamente a partir dos resultados de força aplicada na extremidade da viga e de deslocamentos horizontais e verticais em determinados pontos localizados no pilar e na viga. O momento fletor é obtido do produto da força aplicada na extremidade

da viga pelo seu comprimento mais a espessura da chapa de extremidade. Para se obter o ângulo de rotação da ligação, primeiro é necessário obter a diferença de deslocamentos verticais e horizontais entre a viga e o pilar, depois é calculado o arco tangente do deslocamento horizontal pelo vertical.

A Figura 7 apresenta as curvas momento $\times$ rotação relativa para o ensaio experimental e a modelagem numérica. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados, indicando uma boa representatividade da ligação analisada pela modelagem numérica.

Observa-se que, para ambos os modelos, experimental e numérico, a resistência última da ligação é menor que o momento de plastificação da viga, que é igual a 18462,0 kN.cm, o que caracteriza o colapso na ligação, especificamente, pela ruptura em um dos parafusos tracionados.

A Figura 7 também apresenta os limites do sistema de classificação de Buonicontro (2017) para a ligação estudada. Conforme os limites estabelecidos, a ligação é classificada como semirrígida em termos de rigidez rotacional e como parcialmente resistente em termos de resistência ao momento fletor.

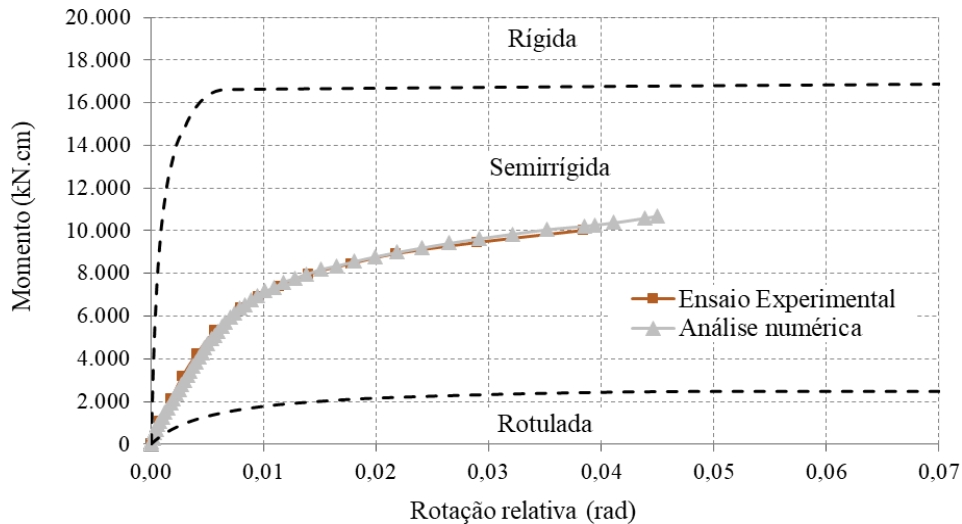


Figura 7. Curva momento $\times$ rotação relativa e classificação da ligação

4.2. Chapa de extremidade ajustada

Com o objetivo de avaliar o comportamento da chapa de extremidade frente as solicitações correspondentes ao seu deslocamento, seis seções na chapa são definidas onde ocorrem os principais deslocamentos. Na Figura 8 são apresentadas as seções longitudinais, definidas como AA, BB e CC, e transversais, definidas como DD, EE e FF, para as quais são obtidos os resultados de deslocamento.

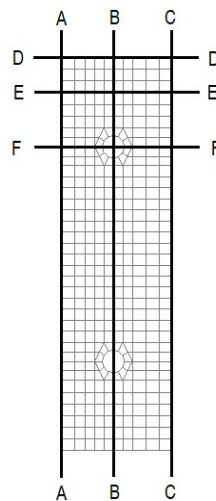


Figura 8. Seções na chapa de extremidade para verificação do deslocamento

Na Figura 9 são apresentados os deslocamentos na chapa de extremidade referente as seções longitudinais AA, BB e CC. A mesa do pilar não é considerada como um elemento rígido; com isso, pode-se observar um deslocamento negativo na parte inferior da chapa onde os elementos da ligação apresentam-se comprimidos.

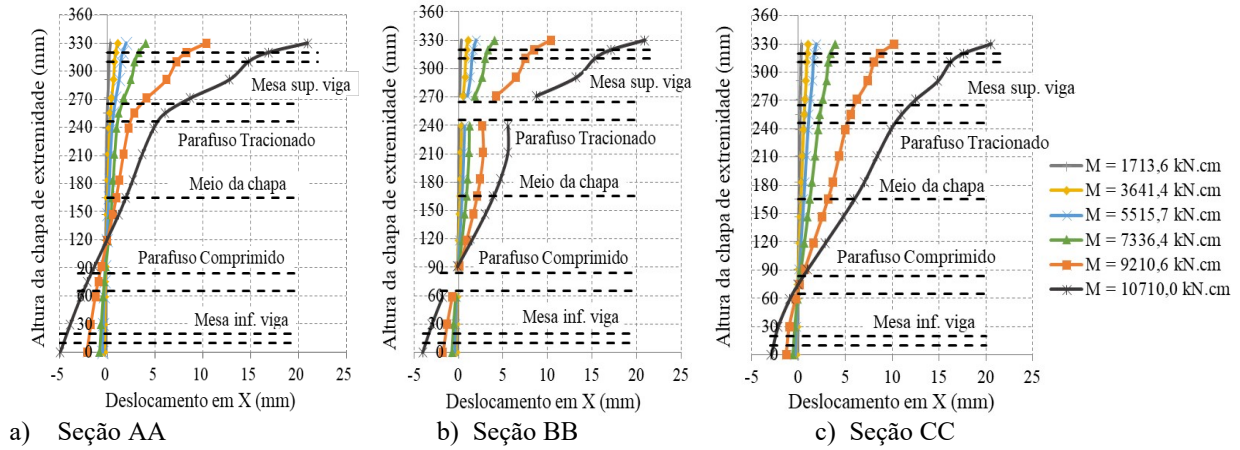


Figura 9. Deslocamentos da chapa de extremidade nas seções longitudinais

Na Figura 10 são apresentados os deslocamentos na chapa de extremidade referente às seções transversais DD, EE e FF. Observa-se que a chapa de extremidade é solicitada à flexão por dois planos, mostrando afastamentos máximos nos pontos correspondentes ao plano médio da alma da viga para as seções transversais EE e FF, e, para a seção transversal DD, os deslocamentos máximos ocorrem na extremidade livre da chapa.

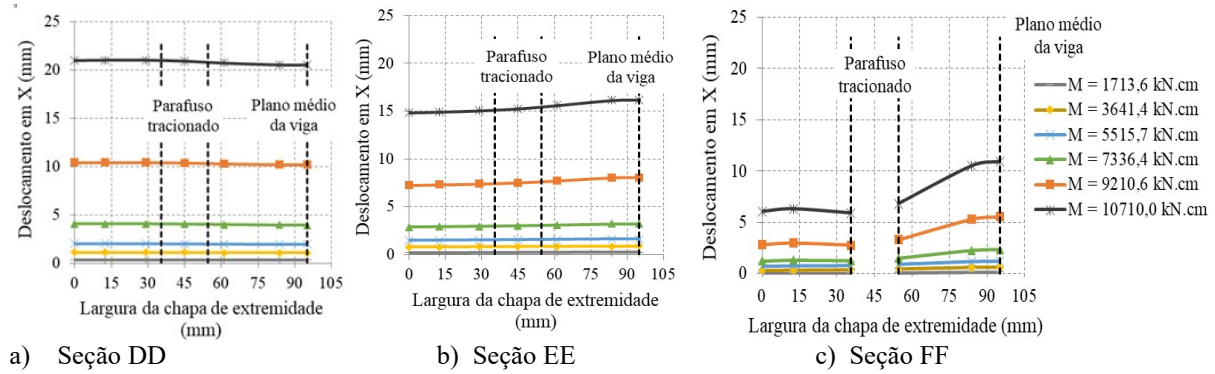


Figura 10. Deslocamentos da chapa de extremidade nas seções transversais

4.3. Mesa do pilar

Com o objetivo de avaliar o comportamento da mesa do pilar frente as solicitações correspondentes ao seu deslocamento, sete seções na mesa do pilar são definidas onde ocorrem os principais deslocamentos.

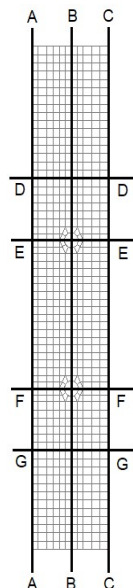


Figura 11. Seções longitudinais e transversais da mesa do pilar para verificação do deslocamento

Na Figura 11 são apresentadas as seções longitudinais, definidas como AA, BB e CC e transversais, definidas como DD, EE, FF e GG, para as quais são obtidos os resultados de deslocamento. A extremidade superior e inferior da mesa do pilar é engastada, assim o deslocamento é nulo.

Na Figura 12 são apresentados os deslocamentos na mesa do pilar referente as seções longitudinais AA, BB e CC. Nota-se que a mesa do pilar, nas seções AA e BB, apresenta o mesmo comportamento da chapa de extremidade, apresentando valores de deslocamentos próximos. Na seção CC, observa-se um deslocamento pequeno na parte superior da mesa devido a sua rigidez e na parte inferior ocorrem deslocamentos negativos com valores e comportamento semelhantes a aqueles produzidos na chapa de extremidade.

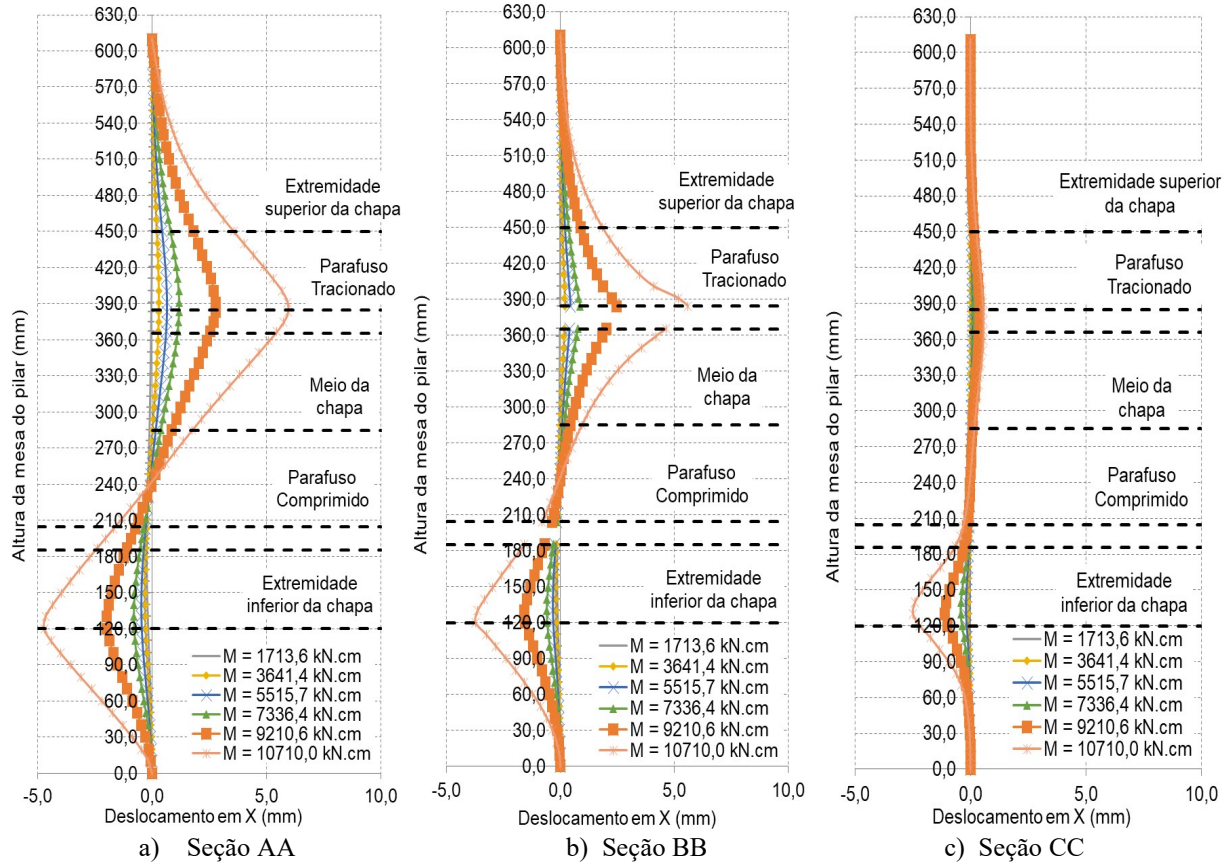
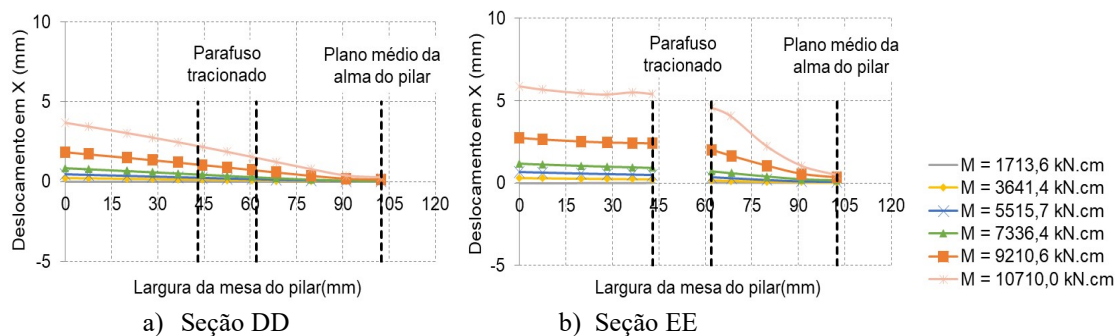


Figura 12. Deslocamentos da mesa do pilar nas seções longitudinais

Na Figura 13 são apresentados os deslocamentos na chapa de extremidade referente às seções transversais DD, EE, FF e GG. Observa-se novamente que, a presença do parafuso não restringe o deslocamento nesta região. Os resultados dos deslocamentos obtidos na extremidade livre da mesa do pilar apresentaram valores próximos daqueles obtidos na chapa de extremidade. Os deslocamentos próximos ao plano médio do pilar tendem a zero e aumentam de forma gradativa até chegar na extremidade livre da mesa do pilar.



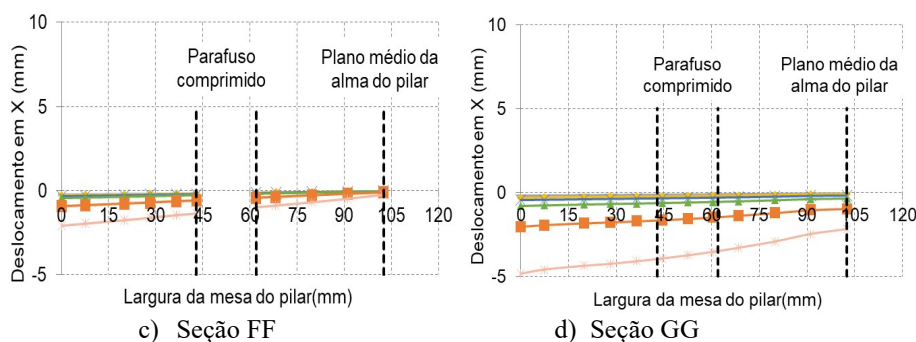


Figura 13. Deslocamentos da mesa do pilar nas seções transversais

5. CONCLUSÕES

A utilização de elementos finitos sólidos, apenas nos elementos onde se torna necessário uma análise mais refinada, e a utilização da simetria contribuíram para a otimização do modelo. Com isso, foi possível simplificar o modelo sem a perda de eficácia, com a garantia de resultados satisfatórios, redução do tempo e custo de processamento do modelo.

Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que a metodologia adotada no trabalho para a realização da análise numérica foi satisfatória. A calibração do modelo e a utilização de parâmetros coerentes garantiram a representatividade dos resultados obtidos em comparação com os resultados da literatura. A curva momento $\times$ rotação relativa da ligação apresentou boa concordância com a curva experimental, indicando uma boa representatividade do comportamento da ligação. Não foi possível efetuar a comparação com outros parâmetros estudados, por falta de informações do ensaio experimental.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) pelo apoio recebido para realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- BERGAMASCO, P. D. A. Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida: análise numérica. 2012. 304 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- BOSE, B.; SARKAR, S.; WANG, Z. M. Finite-element analysis of unstiffened flush end-plate bolted joints. *Journal of Structural Engineering*, v. 123, n. 12, p. 1614-1621, 1997.
- BUONICONTRO, L. M. S. Desenvolvimento de um sistema de classificação baseado nos parâmetros de rigidez e resistência de ligações viga-pilar de estruturas de aço. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Área de concentração: Estruturas) - Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- LUSAS. Modeller Application.15.0-8. London: University of London, 2014.
- OLIVEIRA, L. A. R. Análise de pórticos de aço com ligações viga-pilar e de base de pilar semirrígidas a partir do método dos componentes. 2015. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- OSTRANDER, J. R. An Experimental Investigation of End Plate Connections. 1970. 107 f. Thesis (Degree of Master of Science) - Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, 1970.
- RIBEIRO, L. F. L. Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-coluna com chapa de topo: análise teórico-experimental. 1998. 420 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- SILVA, R. G. L. Análise inelástica avançada de pórticos planos de aço considerando as influências do cisalhamento e de ligações semirrígidas. 2010. 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL ANALYSIS OF BOLTED BEAM-COLUMN FLUSH END PLATE CONNECTION BEHAVIOR OF STEEL STRUCTURES USING 3D FINITE ELEMENTS

Nathalia Alves Dornellas Fonseca, nat_dornellas@hotmail.com¹
Gray Farias Moita, gray@dppg.cefetmg.br¹
Renata Gomes Lanna da Silva, rglanna.silva@gmail.com¹
Fabiano Eduardo Moraes Matos, fabianoemmatos@hotmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira - CEP 30510-000 - Belo Horizonte, MG, Brasil.

Abstract. *The connections play an essential role on the behavior of steel structures, because they influence the internal efforts distributions, the displacements and structural stability. Conventional analyses in steel structures are made admitting the behavior of the beam-column connections as ideally pinned or perfectly restrained, in order to simplify the calculations and to reduce the necessary time for the design. However, the behavior of most connections resides between these two extremes, i.e., it is actually semi-rigid. Therefore, the understanding of the behavior of the connections between the elements is essential for the analysis and design of the structures. This paper presents numerical studies of bolted beam-column flush end plate connection. The connection is analyzed by means of finite elements using the LUSAS program. The objective is to present a study of the behavior of semi-rigid connections with flush end plate. A geometric and material non-linearities analysis was modelled to obtain the moment rotation curve of the connection and, subsequently, compared to an experimental result of the connection. Interesting results are shown and commented.*

Keywords: *Steel structure, Semi-rigid connections, Finite elements.*