



AValiação DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA LIGAÇÃO PARAFUSADA VIGA-PILAR DO TIPO CHAPA DE EXTREMIDADE AJUSTADA VIA ELEMENTOS FINITOS 3D

Nathalia Alves Dornellas Fonseca

Gray Farias Moita

nat_dornellas@hotmail.com

gray@dppg.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG

Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira - CEP 30510-000 - Belo Horizonte, MG, Brasil

Renata Gomes Lanna da Silva

rglanna.silva@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG

Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira - CEP 30510-000 - Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. *A análise convencional de estruturas de aço é feita admitindo-se o comportamento das ligações viga-pilar como idealmente rígida ou perfeitamente rotulada, com o intuito de simplificar a análise 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. O comportamento das ligações pode ser descrito principalmente pela relação momento x rotação, que considera a relação entre o momento fletor que solicita a ligação e a rotação relativa entre os elementos conectados. Este trabalho apresenta uma análise numérica de uma ligação viga-pilar do tipo chapa de extremidade ajustada. A ligação semirrígida é analisada pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o programa LUSAS. O objetivo é apresentar um método alternativo para o estudo do comportamento de ligações semirrígidas. A análise não linear tridimensional via MEF é realizada para obter a curva momento x 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.*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

1 INTRODUÇÃO

As ligações desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas, tendo grande influência nos aspectos econômicos, construtivos e principalmente no estruturais. Isto é, o comportamento global das estruturas de aço depende do comportamento das ligações, e o comportamento das ligações depende diretamente da interação entre os elementos conectados, os meios que as compõem e das características geométricas dos perfis conectados.

Uma das principais etapas na elaboração de projetos de estrutura de aço é o cálculo das ligações entre os elementos estruturais. A escolha correta por um tipo de ligação e o seu dimensionamento adequado proporciona propriedades de resistência, rigidez e estabilidade necessárias à segurança e ao bom funcionamento de toda a estrutura.

A análise convencional de estruturas de aço geralmente é realizada admitindo-se que as ligações viga-pilar são 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. Entretanto, na realidade, as ligações nas estruturas de aço apresentam um comportamento não linear intermediário, definido como semirrígido. Essas ligações permitem algum movimento relativo entre os elementos conectados nas ligações consideradas rígidas e uma determinada transmissão de momento fletor entre os elementos conectados nas ligações consideradas rotuladas. Dessa forma, a consideração das ligações semirrígidas é importante, pois permite análises mais realistas da resposta global da estrutura e dos elementos que a formam, contribuindo para um dimensionamento estrutural mais econômico.

Devido à grande quantidade de parâmetros envolvidos na ligação (componentes e relações constitutivas de seus materiais), a modelagem numérica via elementos finitos tem se tornado mais conveniente, permitindo o estudo da influência de todos os parâmetros, de uma forma mais econômica, 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.

Nas últimas duas décadas, um grande número de estudos avançados via Método dos Elementos Finitos (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. Pode-se citar os estudos apresentados por Bose *et al.* (1997), Ribeiro (1998), Lima (2003), Aman (2009), Bergamasco (2012), Magalhães *et al.* (2014), entre outros. 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.

O objetivo deste artigo é apresentar um estudo do comportamento elastoplástico de uma ligação semirrígida com chapa de extremidade ajustada. Para isso, 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 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR DAS LIGAÇÕES

O conhecimento do comportamento das ligações entre os elementos estruturais é fundamental para a análise e dimensionamento de uma estrutura. As ligações são responsáveis pela transmissão das forças normais, forças cortantes, momentos fletores e de torção. Entretanto, em vários casos práticos, as deformações causadas pela força normal, força cortante e momento de torção podem ser desconsideradas nos procedimentos de análise, devido a sua pequena magnitude em comparação com a deformação rotacional.

O comportamento não linear da ligação pode ser representado pela curva momento $\times$ rotação relativa, 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 as 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 rotulada.

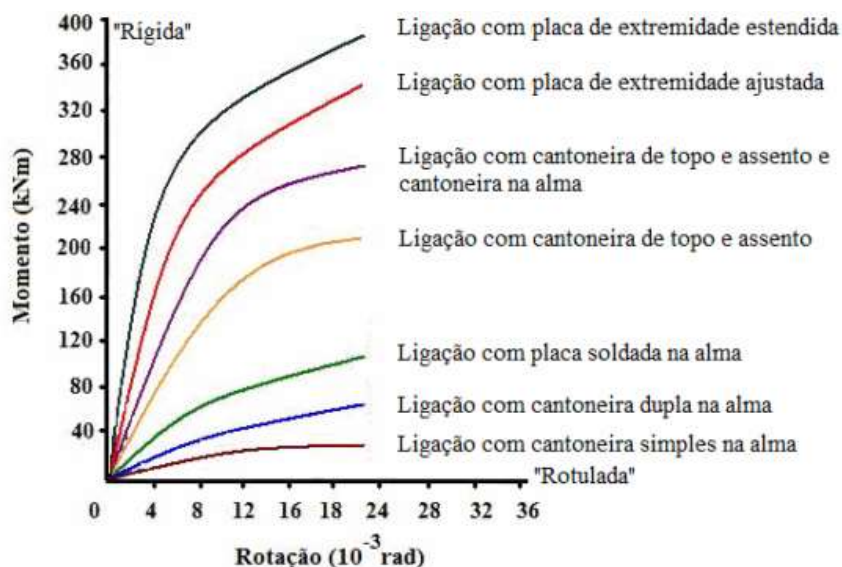


Figura 1 – Curvas momento $\times$ rotação relativa para diversos tipos de ligação (Silva, 2010)

As ligações semirrígidas apresentam comportamento não linear desde o início do carregamento, com redução da rigidez à proporção que a rotação aumenta. A ligação rotulada apresenta pouca resistência à flexão e grande capacidade rotacional. Já a ligação rígida apresenta maior resistência e pouca capacidade rotacional.

Os resultados dos esforços nas barras, deslocamentos e rotações dos nós dependem do tipo de ligação considerado. A Figura 2 apresenta como o momento fletor na barra e a flecha no

meio do vão podem variar para cada tipo de apoio com o mesmo carregamento aplicado. Dessa forma, a rigidez das ligações é responsável pelo comportamento final da estrutura, em termos de rotações, deslocamentos e distribuição de esforços.

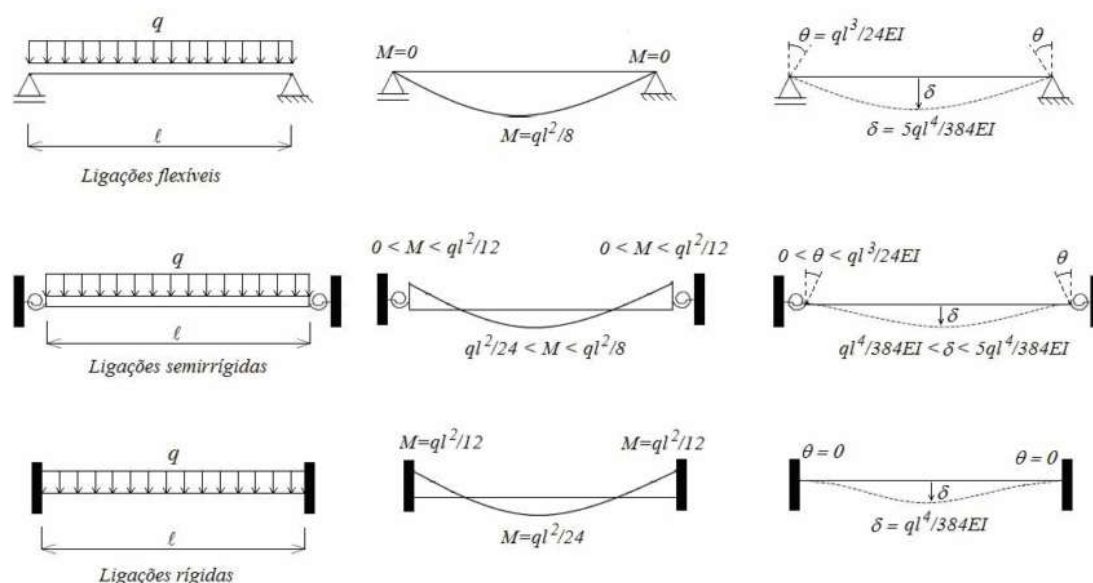


Figura 2 – Influência da rigidez da ligação no comportamento da viga (Silva, 2010)

3 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 foram do tipo cruciforme, onde os parâmetros da ligação adotados na modelagem são apresentados na Tab. 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, conforme Fig. 4.

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 Tab. 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_y (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

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Para a realização da análise numérica, foram seleccionados os parâmetros principais da ligação e definida a geometria do modelo (Fig. 3 e Fig. 4), para a modelagem no programa computacional LUSAS. Ao finalizar a análise numérica, os resultados obtidos foram comparados com os resultados do ensaio experimental de Ostrander (1970).

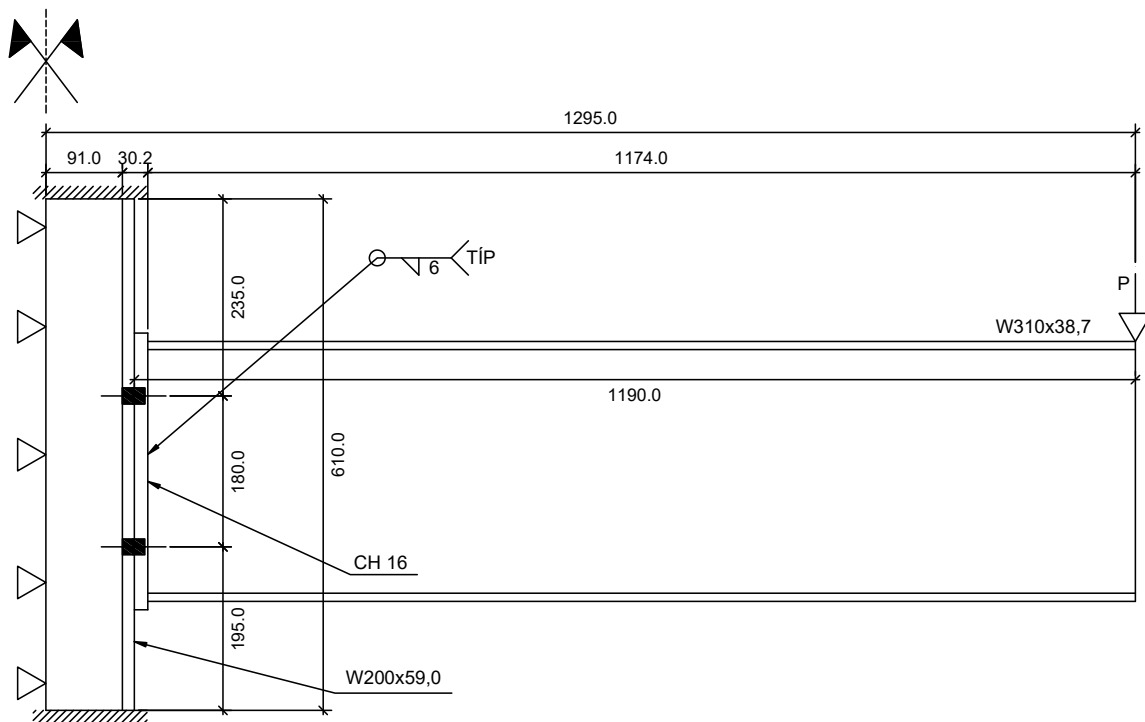


Figura 3 – Geometria do modelo (Ostrander, 1970)

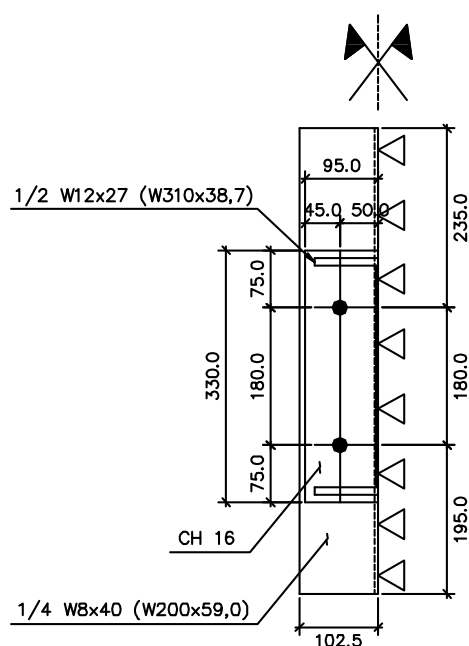


Figura 4 – Geometria e gabarito da ligação (Ostrander, 1970)

4.1 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. 5a) e PN6 (Fig. 5b). Para os elementos da alma do pilar e da alma da viga, foram utilizados os elementos finitos de casca QTS4 (Fig. 5c). Para o contato dos parafusos com a chapa de extremidade ajustada e a mesa do pilar, utilizou-se o elemento de junta JNT4 (Fig. 5d) na simulação.

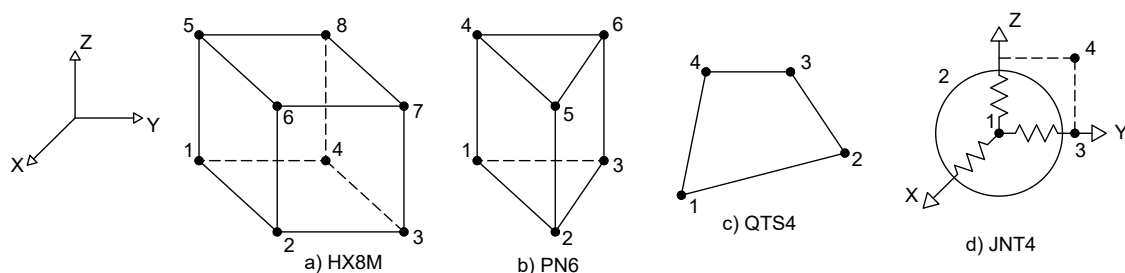


Figura 5 – Elementos finitos adotados na modelagem numérica (Lusas, 2014)

4.2 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 engastada nas direções X, Y e Z, e a extremidade superior do pilar é engastada nas direções X e Y.

Para simular o contato entre a mesa do pilar e a chapa de extremidade ajustada, são 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.

4.3 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 6 apresenta o modelo discretizado.

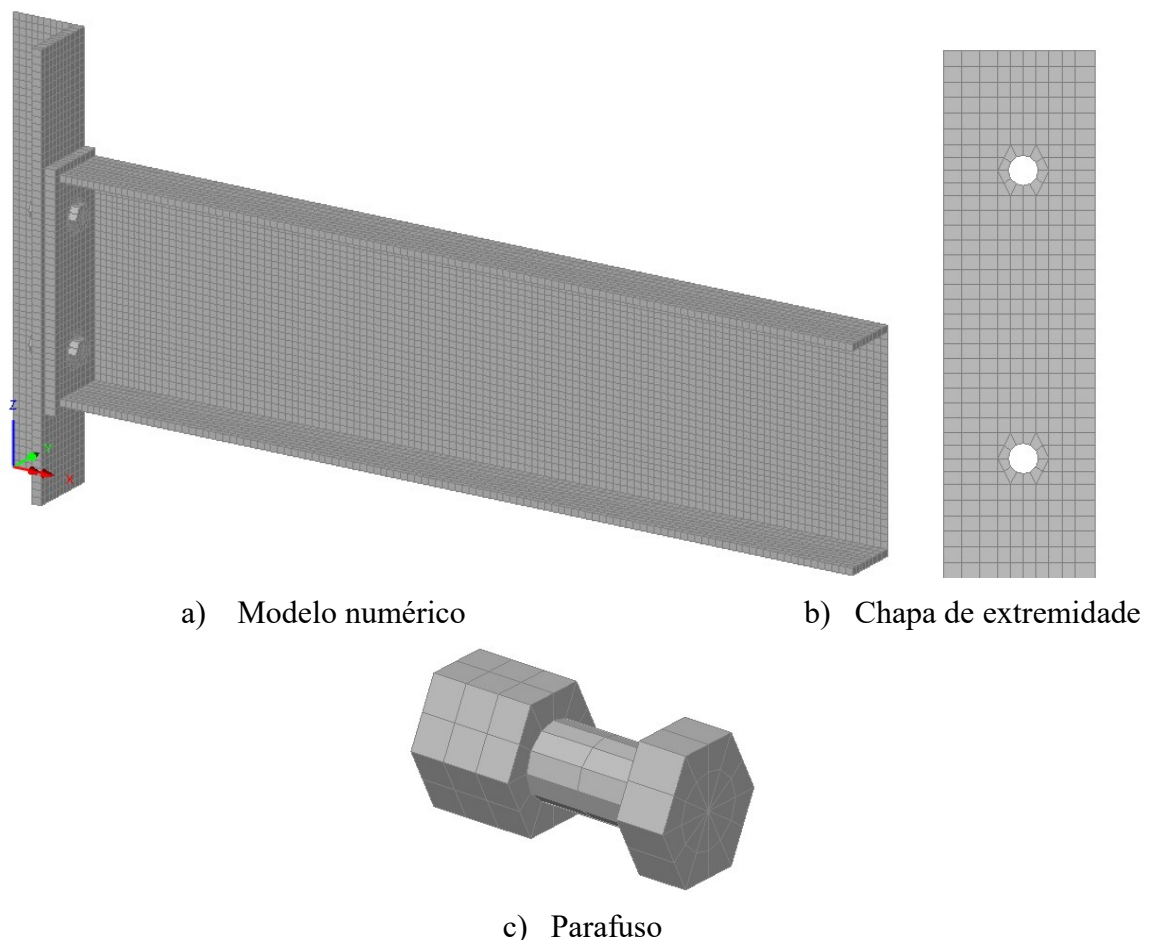


Figura 6 – Malha de elementos finitos

4.4 Solicitações aplicadas

As forças aplicadas aos modelos são de natureza distinta, representando a 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.

4.5 Propriedades físicas dos materiais

As propriedades dos aços adotados para os perfis, a chapa de extremidade e os parafusos foram apresentados na Tab. 2.

Para o material aplicado nas molas dos elementos de junta são realizados testes de sensibilidade e as constantes de mola são calibradas conforme o ensaio experimental. Os valores adotados para as constantes de mola, apresentados na Tab. 3, simulam que os elementos de junta são capazes de permitir a separação entre os pontos nodais em contato, no caso de um esforço de tração no elemento, e de permitir que o esforço de compressão seja transmitido de um elemento para outro por contato.

Tabela 3 – Constantes de mola aplicadas nos elementos de junta

Constantes de mola			
Elementos de contato	Kx (kN/mm)	Ky (kN/mm)	Kz (kN/mm)
Cabeça do parafuso/chapa de extremidade	35,0	0,1	0,1
Cabeça do parafuso/mesa do pilar	35,0	0,1	0,1
Corpo do parafuso/chapa de extremidade	10,0	10,0	10,0
Corpo do parafuso/mesa do pilar	10,0	10,0	10,0

4.6 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.

4.7 Convergência da malha utilizada

De modo a validar o modelo desenvolvido foi executado um refinamento-P. O polinômio de ordem quadrático foi adotado, onde para os elementos da mesa do pilar, da mesa da viga, da chapa de extremidade ajustada da ligação e dos parafusos são utilizados os elementos finitos sólidos HX20 (Fig. 7a) e PN15 (Fig. 7b). Para os elementos da alma do pilar e da alma da viga, são utilizados os elementos finitos de casca QTS8 (Fig. 7c).

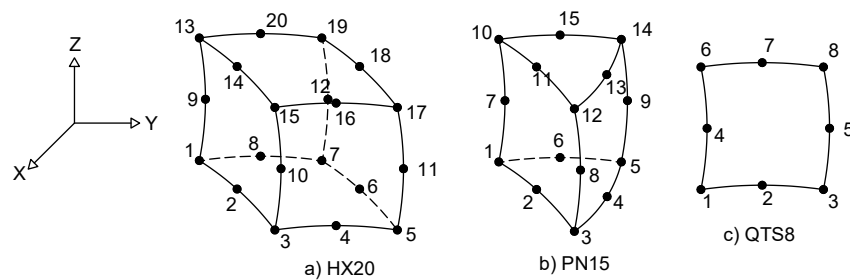


Figura 7 – Elementos finitos quadráticos adotados no refinamento da malha (Lusas, 2014)

Para comparar os dois modelos foram determinadas as curvas momento $\times$ rotação relativa da ligação, conforme mostra a Fig. 8. A partir de uma análise macro dos modelos pode-se observar uma concordância nos resultados computacionais.

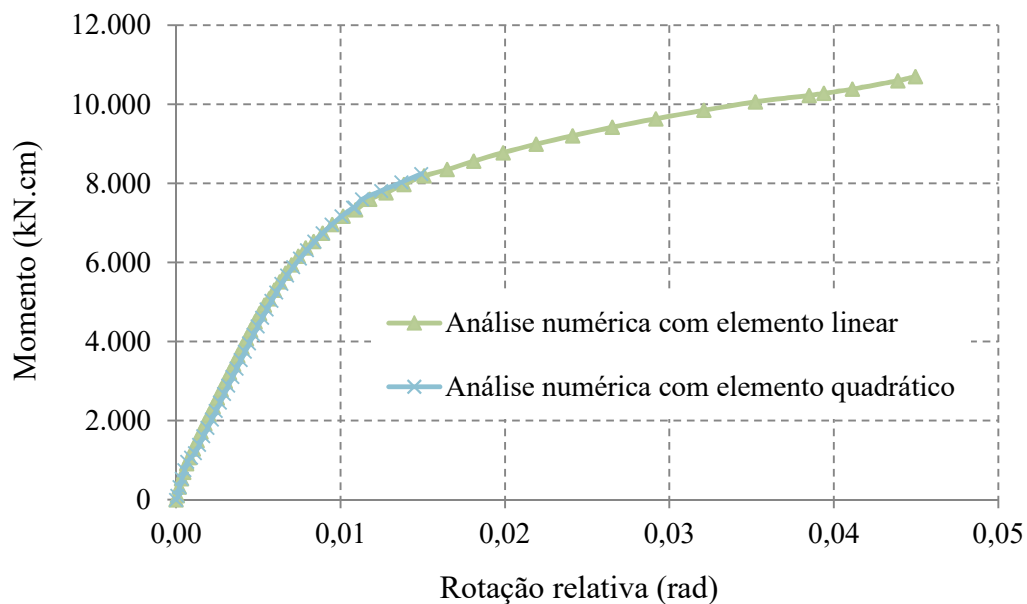


Figura 8 – Comparação das curvas momento $\times$ rotação relativa para o refinamento da malha

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos na análise numérica são comparados com os resultados do ensaio experimental de Ostrander (1970). Na Figura 9 apresenta-se a deformada da ligação.

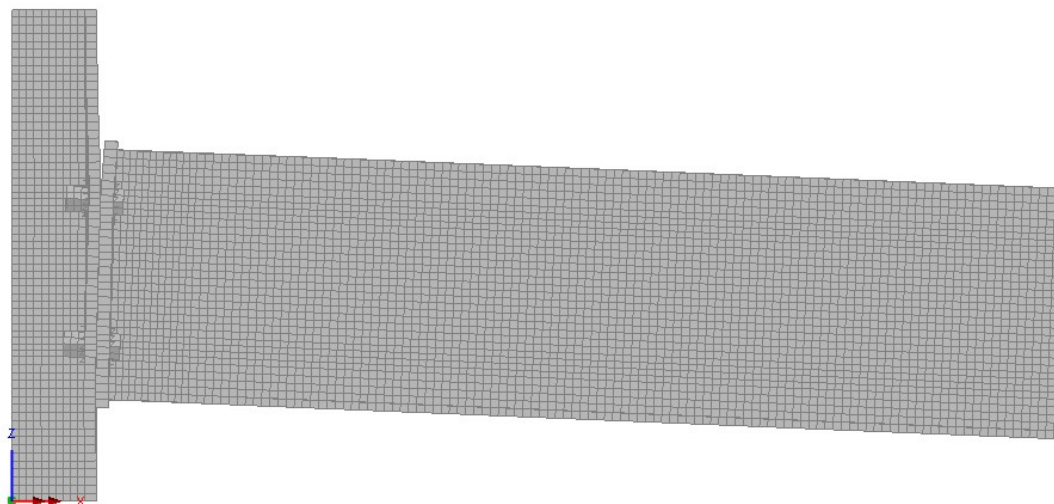


Figura 9 – Vista lateral da deformada da ligação

5.1 Curva momento $\times$ rotação relativa

A Figura 10 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 10 também apresenta os limites do sistema de classificação de Buonicontro (2017) para a ligação estudada. Conforme os limites estabelecidos, a ligação foi classificada como semirrígida em termos de rigidez rotacional e como parcialmente resistente em termos de resistência ao momento fletor.

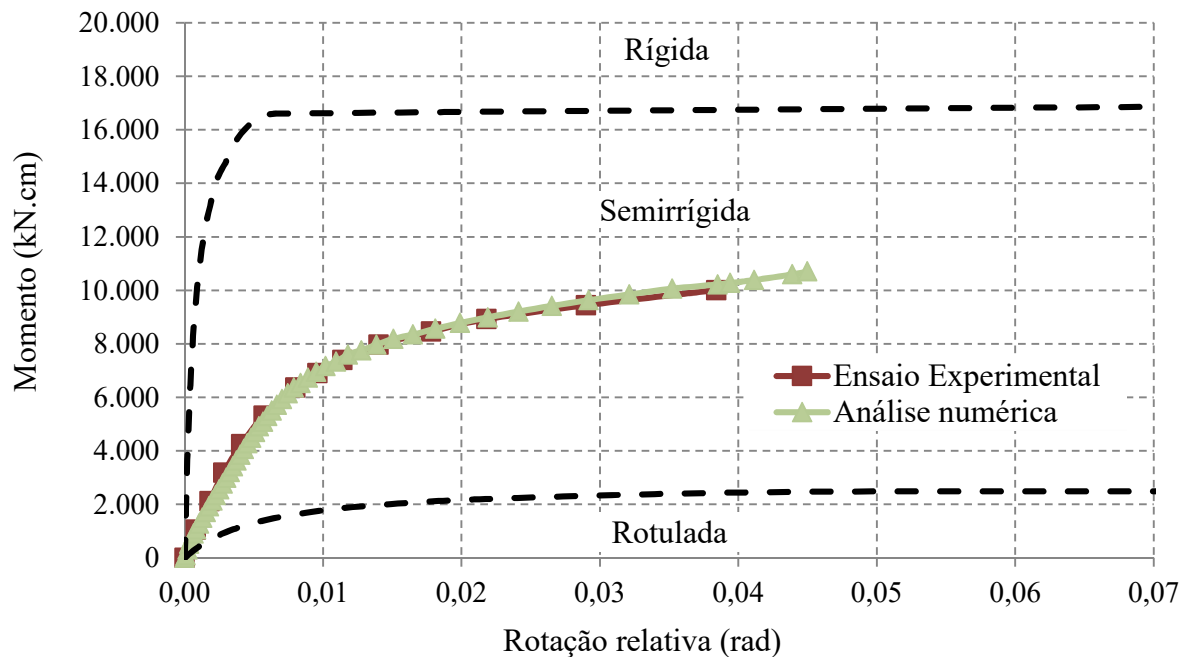


Figura 10 – Curvas momento x rotação relativa e classificação da ligação

Buonicontró (2017) propõe um sistema de classificação de ligações viga-pilar dimensional e não linear. O sistema classifica a ligação quanto à rigidez em rígida, semirrígida e rotulada e quanto à resistência em totalmente resistente, parcialmente resistente e rotulada. Os limites para a classificação em termos de rigidez e de resistência são apresentados na Tab. 4 e Tab. 5.

Tabela 4 – Limites de classificação quanto à rigidez segundo Buonicontró (2017)

Classificação	Limites de Rigidez inicial k_i (kNcm/rad)
Rígida	$k_i \geq 2,5 \times 10^7$
Semirrígida	$5,0 \times 10^5 \leq k_i \leq 2,5 \times 10^7$
Rotulada	$k_i \leq 5,0 \times 10^5$

Tabela 5 – Limites de classificação quanto à resistência segundo Buonicontró (2017)

Classificação	Limites de resistência M_u
Totalmente resistente	$M_u \geq 100\% M_p$
Parcialmente resistente	$15\% M_p \leq M_u \leq 100\% M_p$
Rotulada	$M_u \leq 15\% M_p$

O modelo matemático dado pela Eq. 1 é usado para descrever as fronteiras entre os comportamentos rígido, semirrígido e rotulado, conforme os valores da rigidez inicial k_i e do momento último M_u apresentados na Tab. 4 e na Tab. 5:

$$M = \frac{k_i \theta_r}{1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0} \right)} \quad (1)$$

Onde, θ_0 é a rotação plástica de referência e igual a M_u/k_i .

5.2 Chapa de extremidade ajustada

Com o objetivo de avaliar o comportamento da chapa de extremidade frente às solicitações correspondentes ao seu deslocamento, seis seções na chapa são definidas onde ocorrem os principais deslocamentos. Na Figura 11 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.

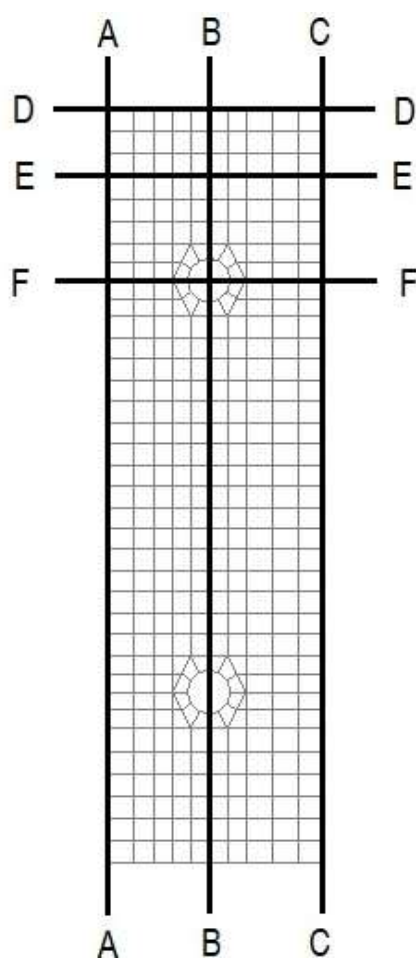


Figura 11 – Seções na chapa de extremidade para verificação do deslocamento

Em função da simetria da ligação em torno do eixo vertical são apresentados os gráficos de deslocamento relativo entre a chapa de extremidade e a mesa do pilar para somente metade da chapa.

Na Figura 12 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.

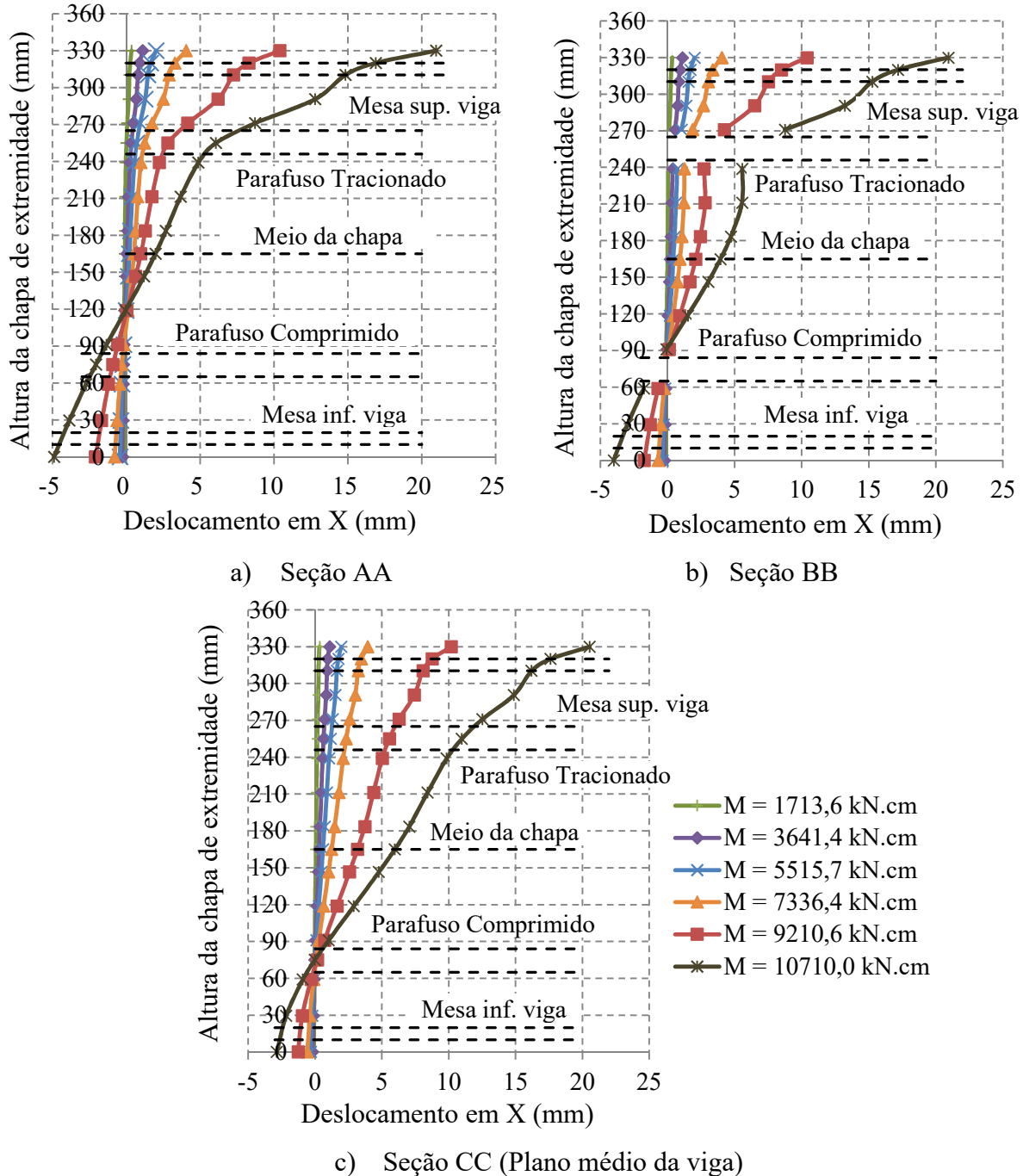


Figura 12 – Deslocamentos da chapa de extremidade nas seções longitudinais

Na Figura 13 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.

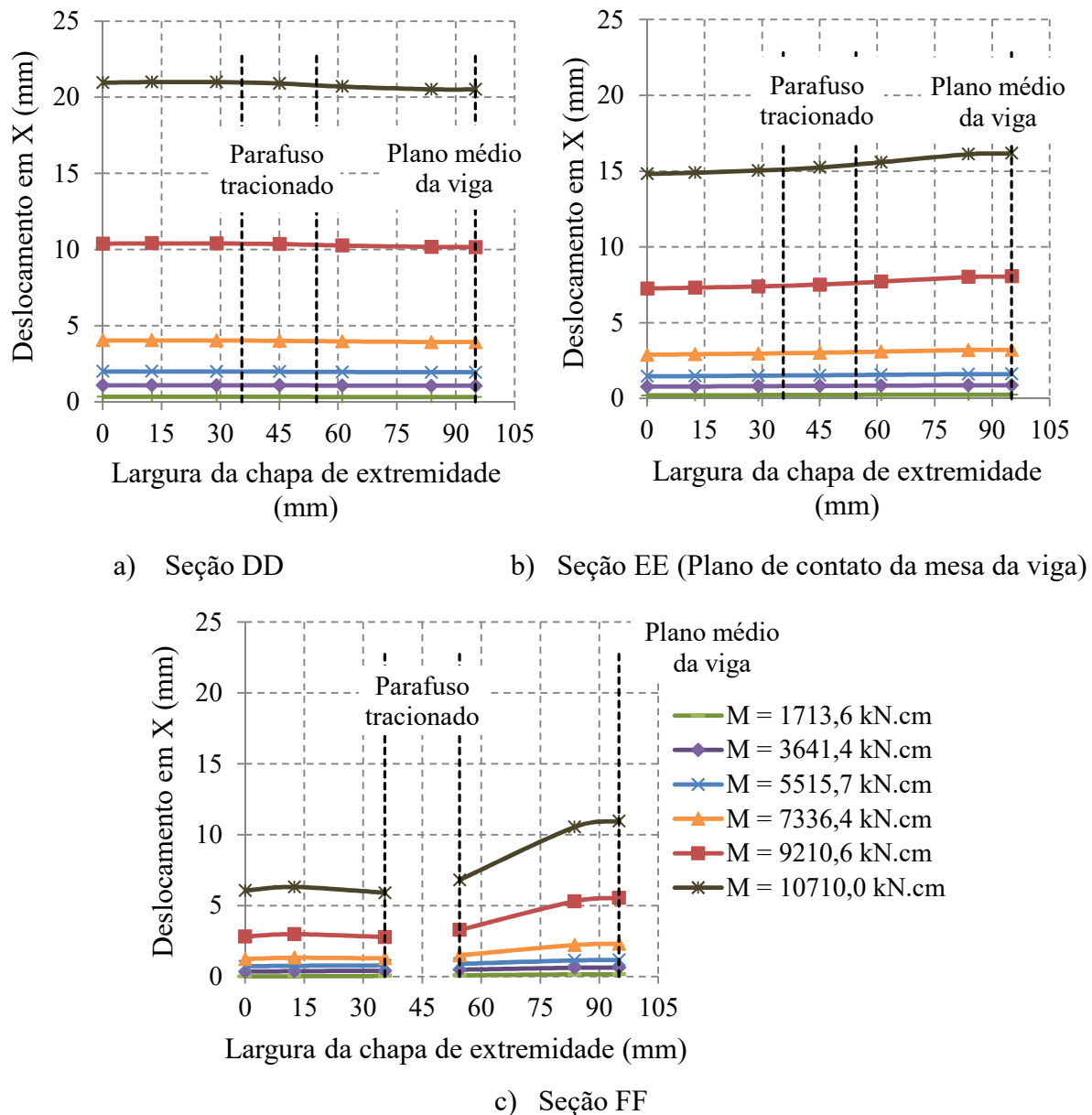


Figura 13 – Deslocamentos da chapa de extremidade nas seções transversais

Na Figura 14 e na Figura 15 são apresentados os gráficos de tensões nas direções Y (paralela ao plano das mesas da viga) e Z (paralela ao plano da alma da viga) na chapa de

extremidade em contato com a viga e em contato com a mesa do pilar para o momento fletor igual a 10710,0 kN.cm, referente a 100% da carga aplicada.

Observa-se que os maiores valores de tensões ocorrem na região do parafuso tracionado e ao longo do plano médio da alma da viga. A região do parafuso tracionado tem pontos locais com grande concentração das tensões σ_y e σ_z , fazendo com que ocorra escoamentos localizados na chapa.

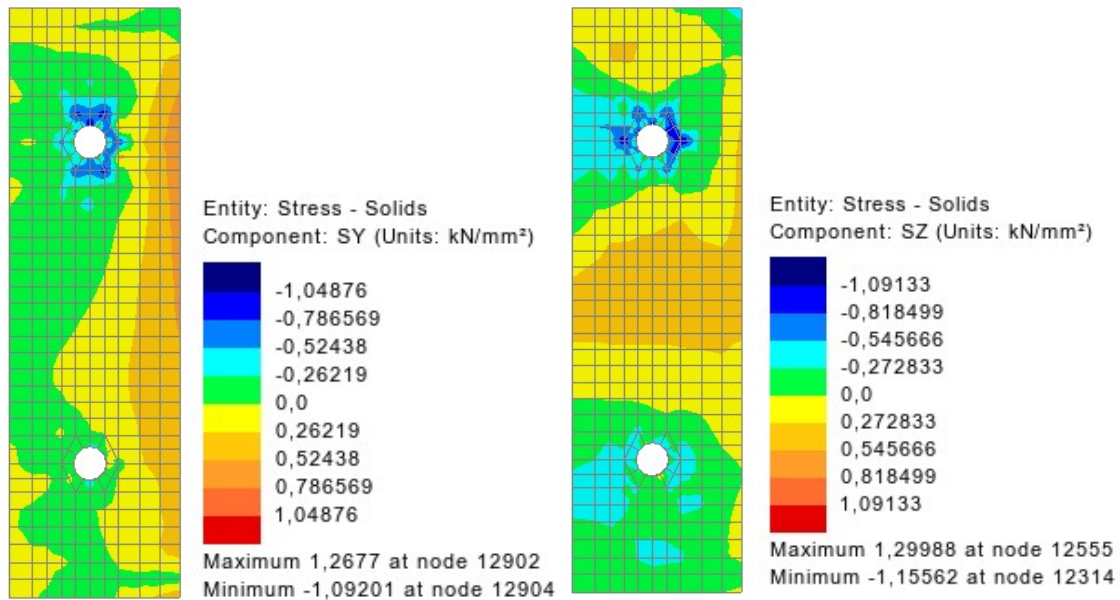


Figura 14 – Tensões σ_y e σ_z na chapa de extremidade em contato com a viga

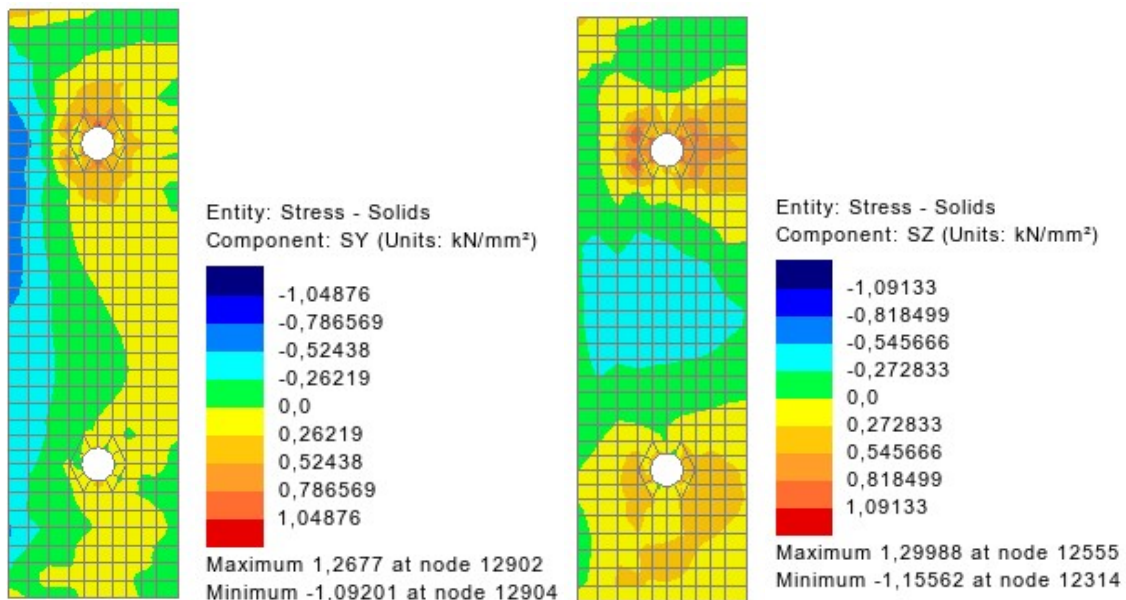
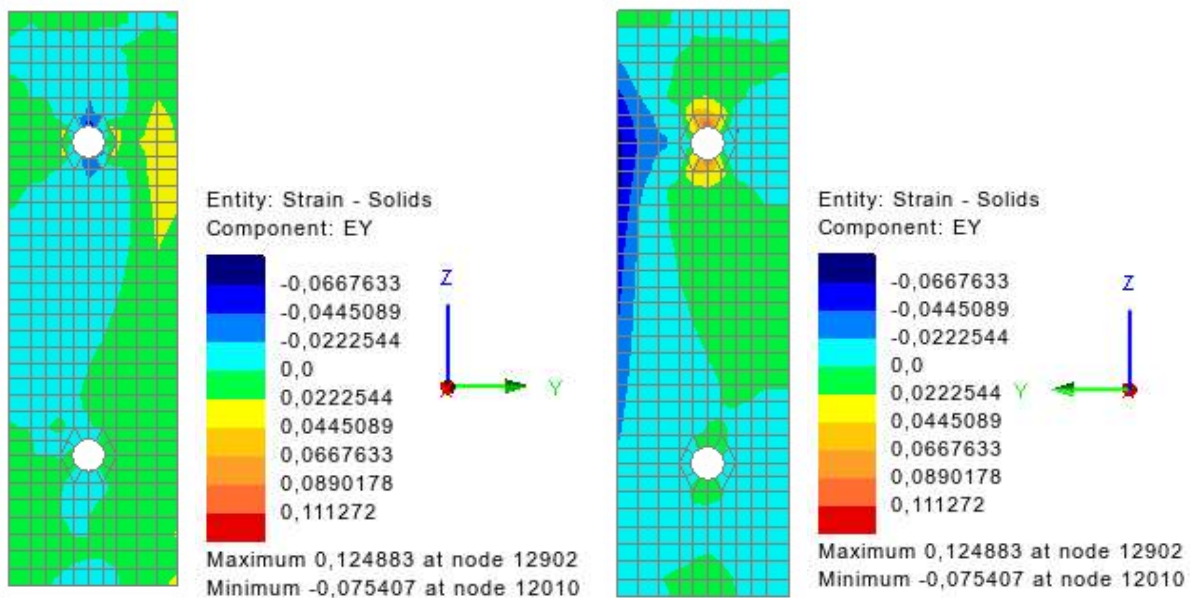


Figura 15 – Tensões σ_y e σ_z na chapa de extremidade em contato com a mesa do pilar

Na Figura 16 pode-se observar que as maiores deformações ocorrem onde a chapa de extremidade está em contato com a viga e ao redor do furo do parafuso tracionado.

Ostrander (1970) não apresentou os resultados experimentais referentes aos deslocamentos, às tensões e às deformações obtidas na chapa de extremidade, assim não foi possível comparar com os resultados da análise numérica.



a) Face em contato com a viga

b) Face em contato com a mesa do pilar

Figura 16 – Deformação ϵ_y na chapa de extremidade

5.3 Parafusos

Na sequência, faz-se uma breve análise do comportamento dos parafusos na ligação pelo modelo numérico.

Na modelagem numérica a protensão é considerada por meio de uma carga de tração aplicada na extremidade do parafuso, do lado da porca, e locada em seu eixo. Na Figura 17 pode-se observar o estado de tensão do parafuso. Devido ao modo de aplicação da protensão, ocorre uma variação da tensão na região da porca, diminuindo gradativamente do eixo central para a extremidade. E, ao longo do comprimento do parafuso, também ocorre uma pequena variação de tensão, diminuindo da extremidade do parafuso em direção à cabeça.

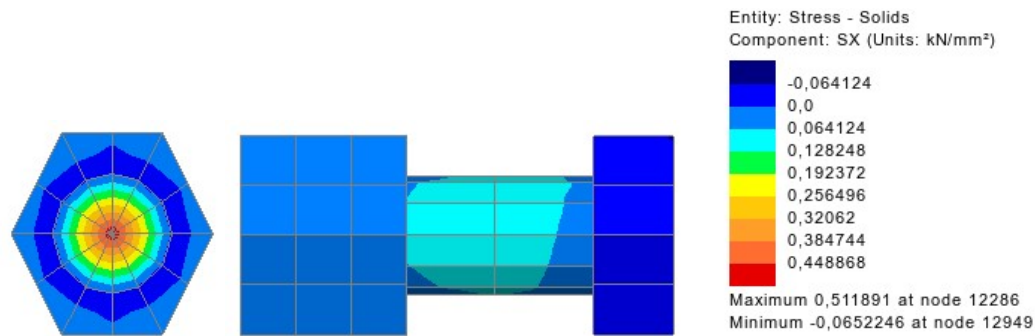


Figura 17 – Tensão σ_x de protensão no parafuso tracionado

Na Figura 18 são apresentados os gráficos de tensões na direção X e a deformada do parafuso tracionado para o momento fletor igual a 10710,0 kN.cm, referente a 100% da carga aplicada. Observa-se na região do fuste do parafuso que está em contato com a chapa de extremidade ocorre o efeito da flexão devido a deformação da chapa. Na Figura 18b pode-se notar que algumas regiões do corpo e cabeça do parafuso atingem uma tensão normal de 1948,0 MPa, bem acima da tensão de ruptura de 825,0 MPa.

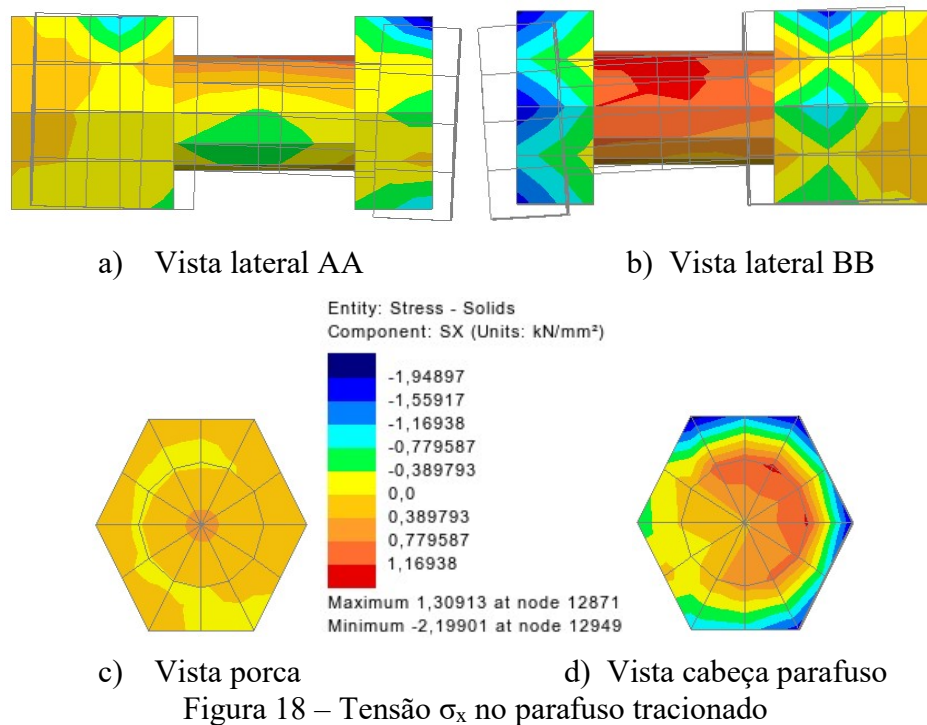
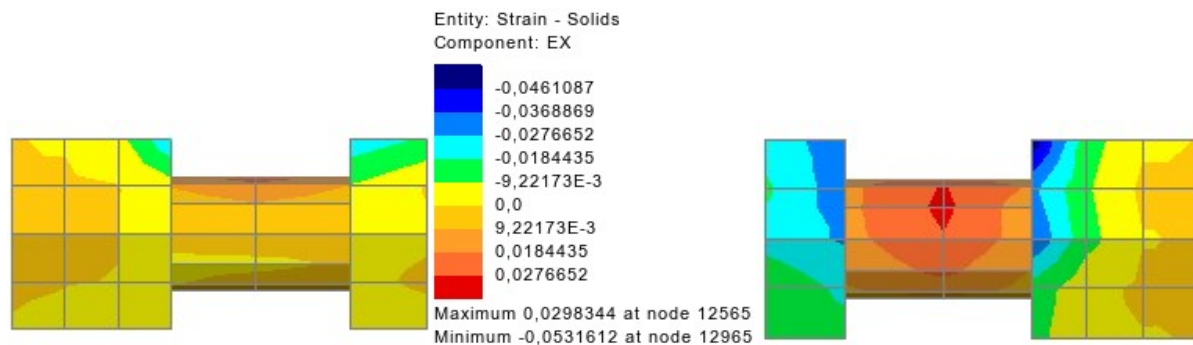


Figura 18 – Tensão σ_x no parafuso tracionado

Na Figura 19 observa-se a deformação longitudinal no parafuso. E, de acordo com a Fig. 19b, nota-se que os maiores valores da deformação longitudinal ocorreram nas regiões de maiores tensões, como esperado.

Ostrander (1970) não apresentou os resultados experimentais referentes aos deslocamentos, às tensões e às deformações obtidas no parafuso, assim não foi possível fazer uma análise comparativa detalhada com os resultados da análise numérica.



a) Vista lateral parafuso 1

b) Vista lateral parafuso 2

Figura 19 – Deformação ε_x no parafuso tracionado

6 CONCLUSÕES

Conforme demonstrado ao longo do trabalho, a análise numérica é uma ferramenta de grande utilidade para o estudo do comportamento de estruturas em geral. A análise numérica, se feita de maneira coerente, assegura bons resultados. Além disso, permite o estudo de diferentes configurações da estrutura com a variação dos parâmetros, como, por exemplo, no caso do estudo da ligação de chapa de extremidade ajustada, onde é possível variar a espessura da chapa, o diâmetro e a quantidade de parafusos, com presença ou não de enrijecedores, as bitolas dos perfis adotados na viga e no pilar, as propriedades dos materiais, e outros parâmetros.

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.

O modelo de elementos finitos tridimensional permite considerar o comportamento não linear elastoplástico da ligação. As comparações entre os resultados experimentais e os obtidos pelo presente modelo de elementos finitos indicam que o modelo numérico é capaz de simular e prever, com uma precisão relativamente boa, o comportamento da ligação. 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.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- Aman, S. S. B., 2009. *Finite element analysis of flush end plate corrugated web beam to column bolted steel connection using LUSAS software version 14.0*. Thesis, Universiti Teknologi Malaysia/Skudai.
- Bergamasco, P. D. A., 2012. *Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida: análise numérica*. Dissertação, Universidade de São Paulo/São Carlos.
- Bose, B.; Sarkar, S.; Wang, Z. M., 1997. Finite-element analysis of unstiffened flush end-plate bolted joints. *Journal of Structural Engineering*, v. 123, n. 12, p. 1614-1621.
- Buonicontró, L. M. S., 2017. *Desenvolvimento de um sistema de classificação baseado nos parâmetros de rigidez e resistência de ligações viga-pilar de estruturas de aço*. Dissertação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/Belo Horizonte.
- En1993-1-8, 2005. *Eurocode 3: Desing of steel structures - Part 1-8: Desing of joints*. Brussels European Committee for Standardization.
- Lima, L. R. O., 2003. *Comportamento de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial*. Tese, Pontifícia Universidade Católica/Rio de Janeiro.
- Lusas, 2014. *Modeller Application*.15.0-8. London: University of London.
- Magalhães, L.; Rebelo, C.; Jordão, S., 2014. Estudo experimental e calibração numérica de ligações metálicas entre vigas I e colunas tubulares. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, v. 23, n. 1, p. 65-74.
- Ostrander, J. R., 1970. *An Experimental Investigation of End Plate Connections*. Thesis, University of Saskatchewan/Saskatoon.
- Ribeiro, L. F. L., 1998. *Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-coluna com chapa de topo: análise teórico-experimental*. Tese, Universidade de São Paulo/São Carlos.
- Silva, R. G. L., 2010. *Análise inelástica avançada de pórticos planos de aço considerando as influências do cisalhamento e de ligações semirrígidas*. Tese, Universidade Federal de Minas Gerais/Belo Horizonte.