

Estudo numérico experimental para avaliação de uma ligação parafusada viga-coluna com chapa de topo

Numerical and experimental evaluation of a beam column rigid connection bolted with endplate

Cristiano Secco Ferarez

Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS

e-mail: 100657@upf.br

Fábio Goedel

Professor M.Sc. Engenharia Mecânica

Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS

e-mail: goedel@upf.br

Zacarias Martin Chamberlain Pravia

D.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Meio Ambiente

Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo – RS

e-mail: zacarias@upf.br

RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo numérico experimental de uma ligação parafusada entre uma viga e um pilar, unidos entre si através de uma chapa de topo. Inicialmente foi realizada uma análise não linear físico-geométrica utilizando o Método dos Elementos Finitos. Em seguida foi realizado o ensaio experimental do protótipo com as mesmas condições de contorno da ligação analisada numericamente. No comparativo dos resultados obtidos, verificou-se que o modelo experimental apresentou rigidez superior em relação ao modelo numérico não linear.

ABSTRACT: This work presents an experimental and numerical study about the beam-column connection fixed through bolts and endplate. In the first place a numerical model was elaborated to analyze the connections with geometric and material non linearity by the Finite Element Method (FEM). In second place the experimental test on the prototype was performed with the same conditions that FEM model. Analyzing the results was found that the rigidity of the experimental model is some greater than the numerical model.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente evolução do ramo de estruturas de aço e conseqüentemente a substituição do concreto pelo aço no Brasil, principalmente se tratando de edifícios de múltiplos andares, que utilizam em sua concepção estrutural perfis laminados a quente como vigas de abas largas, tais como as W e I, torna-se indispensável conhecer o comportamento das ligações entre os elementos que constituem tais estruturas.

O termo ligação, de acordo com [1], é aplicado a todos os detalhes construtivos que promovam a

união de partes da estrutura entre si ou união com elementos externos a ela.

Ao longo da história, as ligações rebitadas passaram a ser substituídas pelas ligações parafusadas. A partir da década de 60, com a evolução na área da engenharia, métodos para análise de ligações parafusadas começaram a ser estudados para melhor se entender o comportamento das mesmas e assim obter um projeto melhor se tratando de questões estruturais.

As ligações parafusadas se sobrepõem perante as outras, pois se destacam na rapidez e agilidade na montagem, tanto em estruturas de aço de pequeno porte, quanto na construção de obras de elevada complexidade.

Este trabalho tem como objetivo validar o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliar a rigidez de uma ligação parafusada do tipo viga pilar com chapa de topo.

Ribeiro [2] realizou o estudo do comportamento estrutural das ligações parafusadas com chapa de topo, apresentando resultados teóricos e experimentais sobre o comportamento das mesmas. Em seu estudo, Ribeiro conclui que os valores obtidos no ensaio experimental eram coerentes com o modelo numérico.

De acordo com Maggi [3], que apresentou em seu trabalho a análise teórica experimental de ligações parafusadas com chapa de topo estendida, os métodos numéricos são capazes de representar satisfatoriamente a transferência de esforços da viga para o pilar, porém deve ser utilizado com critérios, pois fatores como a escolha do modelo constitutivo para modelar a plasticidade dos materiais e a representação adequada da geometria dos componentes influenciam diretamente nos resultados da simulação e são fundamentais para a validação dos resultados numéricos.

Segundo estudos de Nunes [4], que buscou avaliar o comportamento estrutural das ligações viga-coluna com chapa de topo submetida a momento fletor e força axial de tração ou compressão, no comportamento experimental da ligação, a qual será estudada neste trabalho, obtiveram-se curvas de M (momento fletor) $Vs \phi$ (rotação) em que o modelo experimental apresentou uma rigidez superior ao que era esperado analiticamente.

2. DADOS DO PROJETO

Para a análise numérica e fabricação do protótipo foram utilizados os seguintes materiais:

- Parafusos ASTM A325;
- Vigas W ASTM A572 Grau 50;
- Chapa de topo e de base ASTM A36.

Para os materiais citados acima, foram adotados os valores mínimos de resistência ao escoamento e resistência à ruptura do aço, de acordo com a norma brasileira.

A carga aplicada foi de 50 kN, a uma distância de 700mm da união parafusada. Na Figura 1 é possível observar o desenho esquemático da ligação parafusada, onde apresentam-se a posição que a carga foi aplicada na viga e as posições dos parafusos.

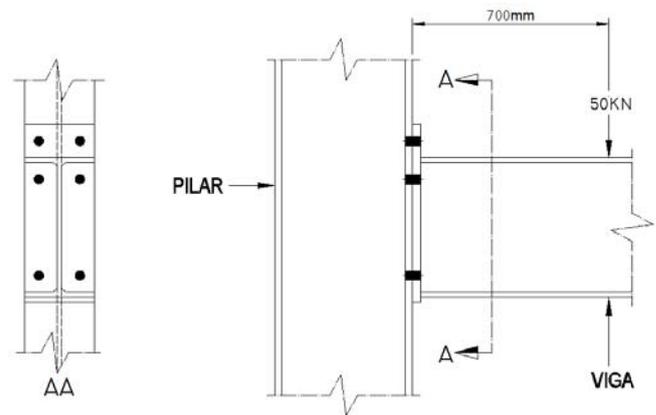


Figura 1 – Esquemático da ligação parafusada

Para o comparativo teórico experimental foram medidos os deslocamentos que ocorreram na viga de acordo com a aplicação da carga, o ponto de medição foi a uma distância de 700mm da união parafusada e centralizado na largura da mesa inferior.

3. ANÁLISE NUMÉRICA

O Método dos Elementos Finitos (MEF), conforme descrito em [5], consiste em um método numérico aproximado para solução de problemas através da subdivisão da geometria do problema em elementos menores, chamados de elementos finitos.

Este trabalho utiliza o software comercial ANSYS para análise de MEF.

A busca para representar numericamente de forma mais aproximada possível o comportamento da ligação parafusada, quando submetida a uma carga estipulada, faz com que o modelo numérico seja preparado com bastante cuidado e baseado em características com embasamento técnico.

Para um modelo numérico representar satisfatoriamente a realidade que ocorre nos ensaios, deve-se considerar a não linearidade dos materiais e a descontinuidade geométrica dos elementos estudados, conforme apresentado nas seções 3.1 e 3.2.

3.1 Não linearidade física do aço

A não linearidade do aço está associada ao regime plástico do material, enquanto a linearidade está associada à parte elástica do material.

Adotou-se para este trabalho o uso do diagrama bilinear, conforme se pode observar na Figura 2.

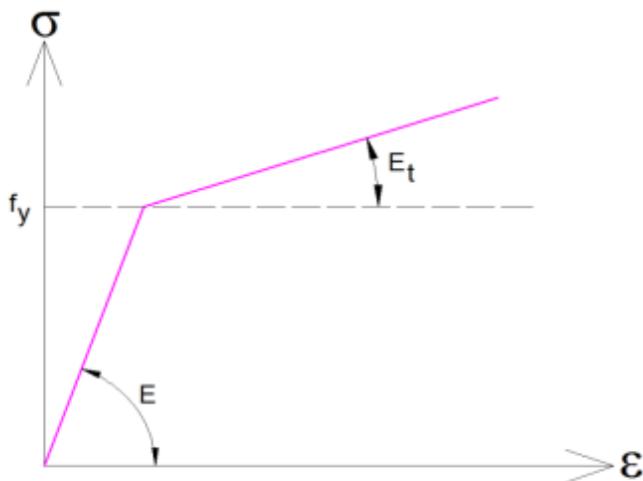


Figura 2 – Diagrama bilinear

Na Figura 2, a reta que possui inclinação E representa o comportamento elástico do material enquanto a reta de inclinação E_t representa o comportamento na zona de plastificação do material.

Assim como o trabalho de Maggi [6], o módulo de tangente (E_t) utilizado nesse trabalho será de 10% do módulo de elasticidade longitudinal (E).

Desta forma, a Tabela 1 apresenta os valores utilizados na definição dos materiais no ANSYS.

Tabela 1 – Valores de bi-linearidade

Tipos de Aço	F_y (Mpa)	E (GPa)	E_t (GPa)
ASTM A572 G50	345	200	20
ASTM A36	250	200	20
ASTM A325	635	200	20

3.2 Discretização do modelo numérico

Na Figura 3, é possível observar o modelo geométrico completo que foi utilizado durante a análise no ANSYS.

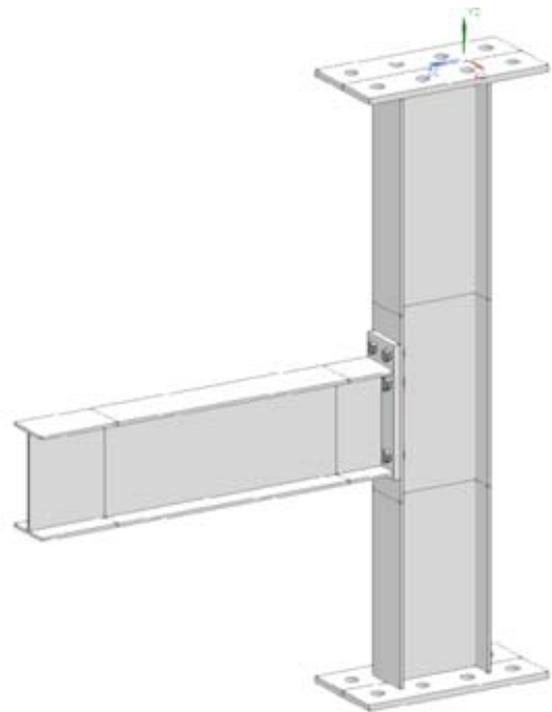


Figura 3 – Conjunto sólido da ligação parafusada

O modelamento do conjunto da ligação parafusada foi construído prevendo uma melhor discretização no ANSYS, por isso é possível observar que tanto a viga em balanço quanto o pilar engastado estão subdivididos em três partes cada (ver Figura 3), a fim de possibilitar o refinamento da malha de elementos finitos mais especificamente nas áreas que mais afetam a rigidez da união parafusada, portanto de maior interesse nesse estudo.

3.2.1 Discretização da viga e da chapa de topo

A malha de elementos finitos com elementos sólidos, utilizada para realizar a análise numérica, pode ser vista na Figura 4. Pode ser visualizado o refinamento feito no início da viga, onde a chapa de topo é soldada na viga, formando assim um conjunto único.

O refinamento realizado na ponta final da viga é devido ao fato de que, no ensaio experimental a carga será aplicada nesta região. Posteriormente serão comparados os deslocamentos obtidos entre análise numérica e o ensaio experimental do protótipo.

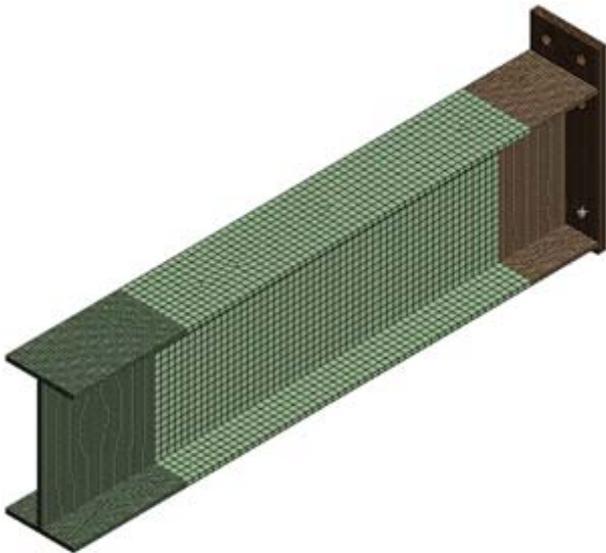


Figura 4 - Malha do conjunto viga e chapa de topo.

A malha mostrada na figura 4 é formada pelo elemento volumétrico de 20 nós chamado de elemento hexaédrico, conforme Figura 5.

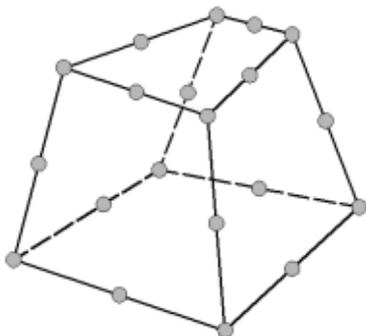


Figura 5 – Elemento hexaédrico de vinte nós.

Para definir o grau de refinamento, ou seja, o tamanho dos elementos finitos, foram realizadas algumas simulações, mantendo-se fixos todos os outros parâmetros da análise, alterando-se somente o tamanho dos elementos nas regiões de refinamento. Com este estudo, chegou-se a conclusão de que elementos com o tamanho de 4mm apresentaram convergência nos resultados.

Portanto, nos pontos críticos, (chapa de topo, início da viga e no final da viga) foram usados elementos com o tamanho de 4mm e nas demais partes foram usados elementos com o tamanho de 10mm.

3.2.2 Discretização do pilar e chapas de base

Assim como as peças da viga e da chapa de topo, o pilar e as chapas de base que servem de fixação para o ensaio experimental, também serão analisados com malha de elementos sólidos

hexaédricos. Todas as considerações de tamanho de malha citadas anteriormente valem para estes componentes. No entanto, as chapas de base, por se tratarem apenas de elementos que servem para fixação do conjunto no ensaio experimental e não influenciarem no comportamento da ligação, foram discretizadas com elementos de finitos com tamanho de 15mm. A Figura 6 demonstra o conjunto e a malha gerada.

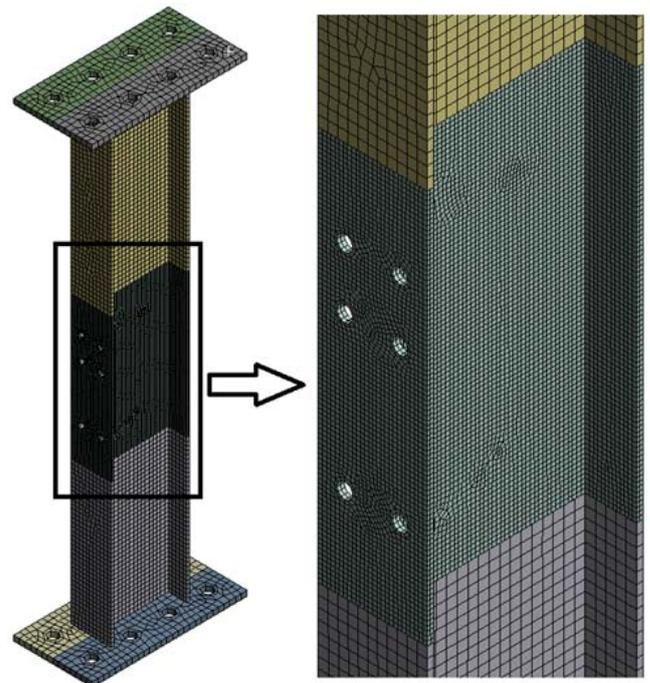


Figura 6 – Malha no conjunto pilar e chapas de base, com detalhe da região parafusada.

O refinamento na área central do pilar é devido ao fato que, nesta região é onde ocorre a junção dos elementos, formando assim a união parafusada do tipo viga pilar com chapa de topo.

3.2.3 Discretização dos parafusos

Para a análise numérica foi considerado, conforme Figura 7, a porca e o parafuso como sendo um único elemento.

Segundo Maggi [6], esse tipo de consideração é possível devido à natureza do carregamento que se pretende aplicar e ao comportamento do conjunto porca/parafuso.

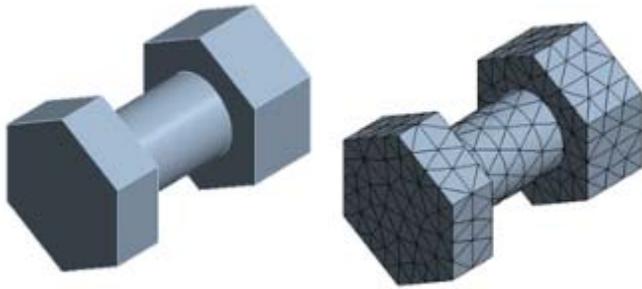


Figura 7 – Elemento parafuso e porca.

Para geração da malha dos parafusos foram utilizados para a discretização elementos do tipo tetraédrico com dez nós, conforme Figura 8.

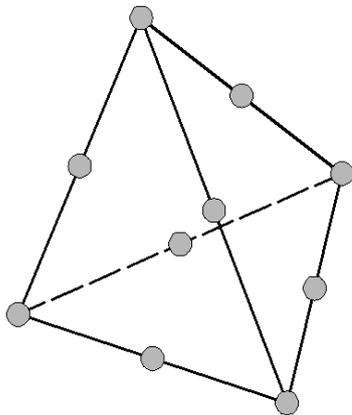


Figura 8 – Elemento tetraédrico de dez nós.

Conforme exposto anteriormente, os elementos relevantes da ligação foram analisados com malha refinada no tamanho de 4mm. Assim, nos parafusos foi adotada essa mesma definição.

A discretização total de todo o modelo numérico, apresentou uma malha formada por 63119 elementos e 288931 nós.

3.3 Descontinuidades geométricas

Em função da sua tipologia construtiva, as ligações parafusadas apresentam inúmeras descontinuidades geométricas. Isso se deve ao fato de que um grande número de componentes isolados, ao serem agrupados, formam a ligação. Portanto, para uma simulação em que se deseja obter um comportamento mais próximo do real possível, é fundamental considerar essas descontinuidades. Para isso foram utilizados elementos de contato, os quais têm como objetivo simular as interfaces dos componentes que constituem o modelo.

A Figura 8 apresenta as regiões onde foram considerados elementos de contatos com atrito (fricção) entre as interfaces das peças.

De acordo com a legenda da Figura 8, os contatos são definidos como:

1. Contato de atrito entre porca do parafuso e face da mesa do pilar, atrito igual a 0,20.
2. Contato de atrito entre o fuste do parafuso e as paredes internas dos furos, atrito igual a 0,20.
3. Contato de atrito entre chapa de topo e mesa do pilar, atrito igual a 0,20.
4. Contato de atrito entre cabeça do parafuso e face da chapa de topo, atrito igual a 0,20.

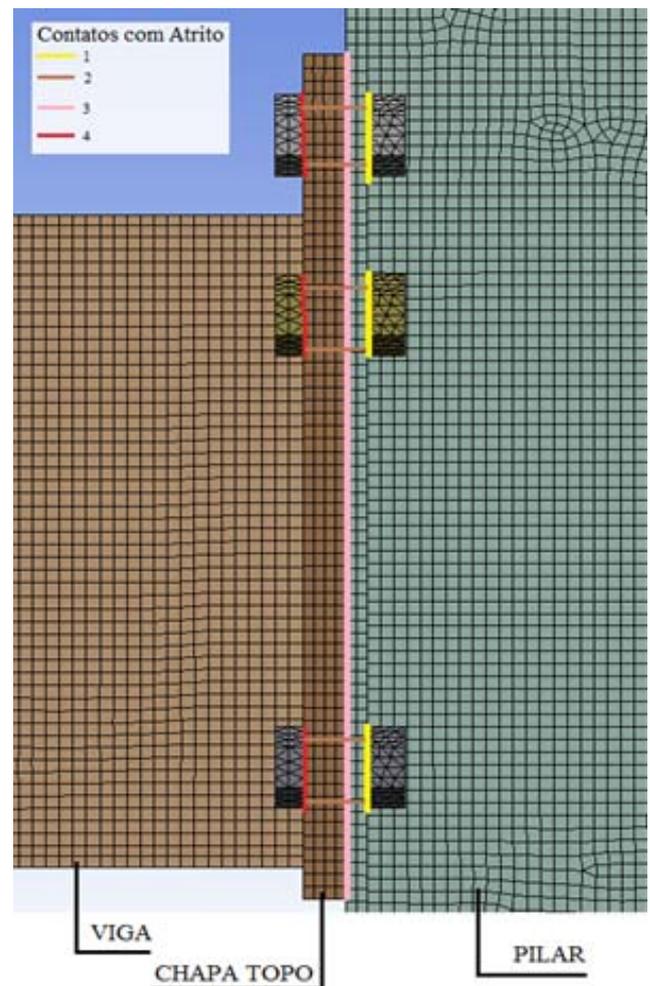


Figura 8 - Contatos de atrito

3.4 Forças de carregamento

Foram consideradas para a análise numérica duas cargas sobre o modelo, são elas:

- 1 – Força de pretensão dos parafusos;
- 2 – Força vertical, igualmente a ser utilizada no ensaio experimental.

A força de pretensão é necessária para simular o aperto imposto aos parafusos no ensaio experimental. A pretensão leva ao aparecimento de pressão de contato entre chapa de topo e a mesa do pilar, unindo assim as peças, gerando as forças de atrito entre as peças.

O valor adotado para a pretensão dos parafusos foi retirado da NBR 8800:2008 [7], item 6.7.4.1, tabela 15, que estipula o valor de 53kN para parafusos ASTM A325 e diâmetro de 1/2" (meia polegada).

O carregamento vertical aplicado de cima para baixo foi distribuído na mesa superior da viga, conforme pode ser visto na Figura 9. A carga aplicada na estrutura foi de 50kN.

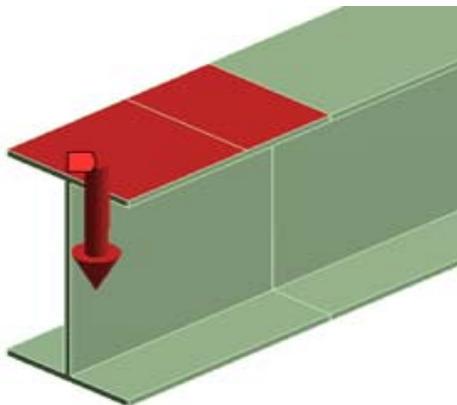


Figura 9 – Carregamento da viga

3.5 Restrições do modelo numérico

A Figura 10 apresenta as restrições de translação em x, y e z, aplicadas nas extremidades das chapas de base no modelo numérico, assim caracterizando um engaste.

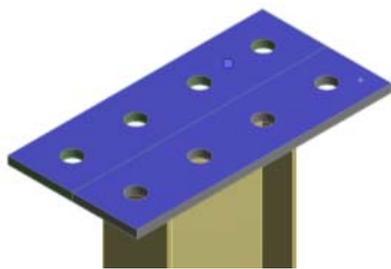


Figura 10 – Restrição do modelo

A Figura 11 apresenta a distribuição de tensão de von Mises para a análise numérica.

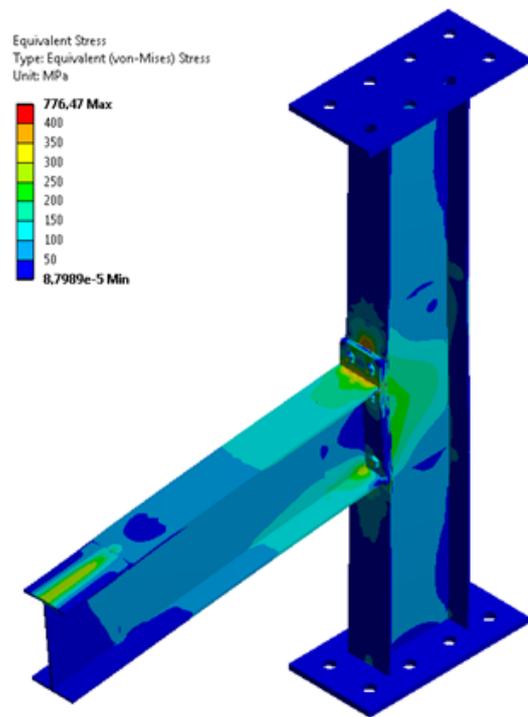


Figura 11 – Distribuição de tensão de von Mises

4. ENSAIO EXPERIMENTAL

Durante o ensaio experimental foram adotadas e reproduzidas todas as condições consideradas no ensaio numérico.

As vigas utilizadas para a confecção do protótipo são do tipo W 200 x 19,3 ASTM GRAU 50. Para a verificação das propriedades de resistência mecânica do material, foi realizado um ensaio de tração em corpos de prova retirados do perfil a ser utilizado, onde os valores obtidos foram semelhantes aos especificados pela norma do material.

Vale ressaltar que para a chapa de topo que faz a união entre as vigas, não foi realizado nenhum ensaio para a verificação das propriedades mecânicas.

A aplicação da carga de 50 kN foi feita pela utilização de um macaco hidráulico de simples ação, da marca ENERPAC, com capacidade nominal de 100kN.

Para o controle da carga aplicada foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 100 kN.

A medição do deslocamento de flexão da viga se deu por meio de transdutor linear. Para a leitura dos dados foi utilizado o sistema de aquisição de dados comercialmente conhecido como MGCplus da empresa HBM.

O protótipo foi engastado em ambas as bases em um pórtico rígido. O macaco hidráulico ficou

posicionado entre o pórtico e a viga em balanço, conforme Figura 12.



Figura 12 – Montagem do macaco e transdutor

Na Figura 13 é possível observar a montagem do protótipo para a realização do ensaio experimental.



Figura 13 – Montagem do protótipo

5. RESULTADOS

Com os resultados obtidos após análise numérica e ensaio experimental obtêm-se a curva de F (Força) Vs d (Deslocamento), apresentada na Figura 14.

Para fins comparativos, realizou-se uma análise numérica linear. Na análise linear foi considerada a união entre viga e pilar como sendo elementos soldados, onde não existe atrito e nem influência da ação dos parafusos. Tal comparativo pode ser visto na Figura 14. Nota-se que para este tipo de análise, o modelo com comportamento linear é mais rígido do que o modelo experimental, como já era esperado.

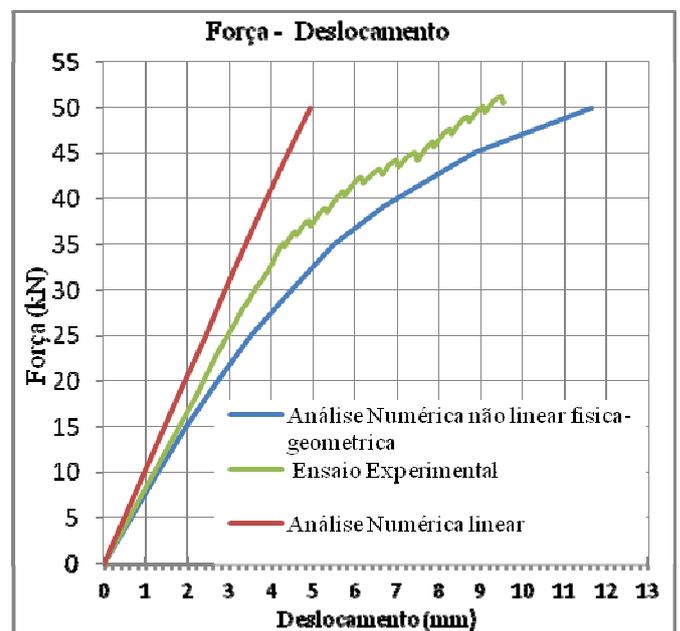


Figura 14 – Comparativo teórico-experimental

6. CONCLUSÕES

Nota-se através da Figura 14 que o modelo experimental apresentou maior rigidez que o numérico considerando as não linearidades geométrica e material, com resultados coerentes em termos qualitativos. Quando se compara o modelo experimental com os resultados obtidos numericamente com análise linear, nota-se uma grande mudança no comportamento da estrutura analisada, apresentando-se mais rígida e mostrando assim, a importância das considerações das não linearidades.

Comparando-se quantitativamente o modelo numérico não linear e o modelo experimental em termos de deslocamento, para cargas até 15kN a diferença no deslocamento foi menor que 10.2%,

sendo que a partir desse valor, verificou-se maiores diferenças, sendo 15.1% para 25kN, 19.9% para 35kN e 17.2% para 50kN.

A diferença obtida pode ser influenciada pelas propriedades mecânicas utilizadas no ensaio numérico, visto que seria necessário um estudo mais criterioso dos valores reais de resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade dos materiais. Essa diferença também pode ter sido influenciada pelos tipos de contatos adotados e o coeficiente de atrito utilizado.

Visto que obtiveram-se diferenças bastante significativas nos comparativos teóricos-experimentais, para uma conclusão final sobre a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) na avaliação de ligações parafusadas é necessário aprofundar o estudo sobre o comportamento dos aços.

A substituição do diagrama bilinear pelo diagrama multilinear na análise numérica, pode diminuir significativamente a diferença entre os valores obtidos. Isso porque o diagrama multilinear descreve melhor o comportamento dos aços entre o limite de escoamento e o limite de ruptura.

Outro ponto importante é reavaliar os valores de coeficiente de atritos entre os materiais.

A realização de um número maior de estudos paramétricos experimentais e numéricos fornecerão mais informações sobre o comportamento do modelo de ligação aqui analisada.

REFERÊNCIAS

[1] LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS. Volume 1, 4 ed. Instituto Aço Brasil, Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, CBCA, 2011.

[2] RIBEIRO, L.F.L. (1998). Estudo do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo: Análise Teórico-Experimental. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

[3] MAGGI, Y.I. (2004). Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

[4] NUNES, P.C.L. (2006). Análise Paramétrica de Ligações com Placa de Extremidade em Aços Estruturais Submetidas a Momento Fletor e Força Axial. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

[5] ALVES FILHO, Avelino. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE. São Paulo: Érica, 2000.

[6] MAGGI, Y.I. (2000). Análise Numérica, via M.E.F., do Comportamento de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2008. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto em Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.