

ESTUDO HÍBRIDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO CISALHAMENTO EM PARAFUSOS DE LIGAÇÕES METÁLICAS TIPO T

Wellington Andrade da Silva^{a,b}, Luciano Mendes Bezerra^a, Marcus Alexandre Noronha de Brito^{a,c}

^aPrograma de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Ed. SG 12, Brasília-DF, Brasil. lmbz@unb.br, wellingtonsilva@unb.br, marcusanb@unb.br, <http://www.unb.br>

^bUniversidade Federal de Goiás, Campus Catalão, Catalão-GO, Brasil. <http://www.ufg.br>

^cInstituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília, Campus Samambaia, Samambaia-DF, Brasil. marcus.alexandre@ifb.edu.br, <http://www.ifb.edu.br>

Palavra-chave: Híbrida, T, parafusos, cisalhamento

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise numérica e experimental com o objetivo de investigar o comportamento estrutural de ligações parafusadas tipo T (ou T). Objetiva-se, em particular, o estudo da ruptura de parafusos de ligações tipo T por cisalhamento combinado com esforços de tração. Enquanto a determinação dos esforços de tração nos parafusos é conhecida na literatura, as forças de cisalhamento em ligações T ainda não foram estudadas adequadamente. Nesse aspecto, essa pesquisa inovadora tenta destacar a importância da força de cisalhamento no mecanismo de colapso dos parafusos da ligação T. Devido à grande dificuldade em se medir experimentalmente as tensões de cisalhamento na cabeça dos parafusos, o conhecimento dessas tensões é feito nessa pesquisa através de dois procedimentos. As análises numéricas incluem modelos tridimensionais em elementos finitos associados ao comportamento não-linear realizadas com o software ANSYS. Com o uso dos resultados experimentais e numéricos, obtêm-se relações de caráter qualitativo entre força aplicada na alma do perfil T e as tensões de cisalhamento e de tração nos parafusos. Avaliam-se em seguida as condições de combinação entre esforços de tração e de cisalhamento que levam os parafusos da ligação ao colapso. Conclui-se que tais forças de colapso dependem diretamente da rigidez do flange do perfil T e podem ser substancialmente amplificadas pelo efeito alavanca devido à excentricidade entre carga atuante na alma e os parafusos no flange do perfil T.

1-INTRODUÇÃO

As ligações tipo T são freqüentemente usadas como elemento de ligação entre tirantes e viga. A validade da tipologia do ensaio de caracterização do perfil T, por meio da utilização de dois perfis T como componentes de uma ligação, pode apresentar inconsistência em comparação à fixação com base rígida, quando representa ligação com coluna ou partes suficientemente enrijecidas. A flexibilidade dos perfis conectados tem influência significativa no comportamento dessas ligações, principalmente se esses perfis, ou a montagem do duplo T, não forem perfeitamente simétricos, o que ocorre na maioria dos casos (tirante fixado em viga, ligação viga coluna). Além disso, a tipologia de duplo T é comumente aplicada à chapa de topo sem a consideração de que, em uma ligação viga-pilar, os elementos conectados possuem flexibilidade diferente, ocasionando a mudança dos mecanismos plásticos e de colapso. Dessa forma conclui-se que para a caracterização de perfil T como componente de ligações que utilizam esse dispositivo para unir vigas e pilares, testes com perfil T conectado a um apoio rígido seria o mais adequado (Maggi, 2004).

Observações experimentais feitas a partir do trabalho de Freitas (2005) mostraram que com a utilização de uma base rígida para fixação do perfil T, o efeito adicional de flexão no flange da ligação T provoca um esforço significativo de corte nos parafusos, o que ocasionou a ruptura de parafusos de algumas ligações ensaiadas. Nesses casos ficava evidente a combinação de esforços de tração e cisalhamento nos parafusos, que pode ser observado num dos parafusos ensaiados, conforme é representado na Figura 1. O esforço cortante está diretamente relacionado à rigidez do flange da ligação T e pode ser evidenciado como um mecanismo de ruptura da ligação T, associado ao esforço de tração existente no parafuso. Entretanto, o referente assunto ainda não foi objeto de estudo de trabalhos científicos e as normas não apresentam indicação de como tal esforço pode ser verificado. Na Figura 1 (a), nota-se uma acentuada deformação do flange da ligação T ensaiada. Observando a Figura 1 (b), percebe-se um dente formado no fuste do parafuso correspondente à espessura do flange – forçando, portanto, o fuste do parafuso a romper por cisalhamento combinado com tração.

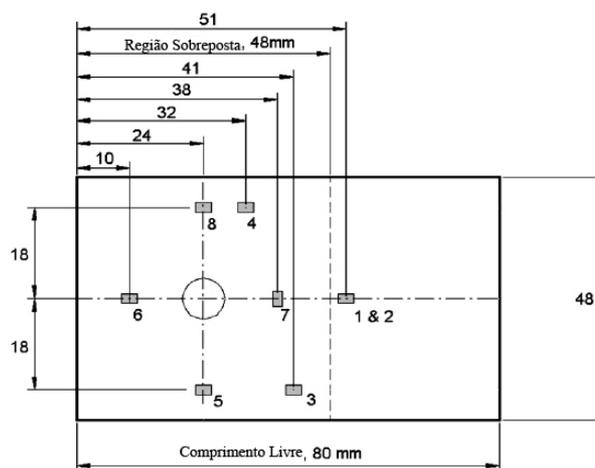


Figura 1 – a) Flange e parafuso com abertura de um dente; b) Esforços atuantes no parafuso.

2-MODELOS DE INSTRUMENTAÇÃO PARA CISALHAMENTO

Em razão da grande dificuldade de se instrumentar um ensaio experimental para o estudo do cisalhamento de parafusos em ligações parafusadas, no que tange ao estudo de deformações e tensões geradas na placa e nos parafusos, é comum adotar alguns critérios para a investigação, que são: definição de pontos na superfície da chapa, para leitura de deformações, e rigidez da ligação. McCarthy et al. (2005) instrumentaram quatro ligações com extensômetros, em pontos específicos. Nos ensaios, McCarthy et al. (2005) utilizaram

um carregamento com nível de tensão baixo, para não causar danos detectáveis a ligação, composta por placas de material isotrópico, com uma carga máxima de 5 kN. Foram utilizados extensômetros com comprimento de 3 mm e todos ficaram posicionados na direção do carregamento, exceto o extensômetro 7, que foi alinhado no sentido transversal. A seguir, na Figura 2, são indicadas as posições dos extensômetros usados por McCarthy et al. (2005).



Todas as Medidas em mm

Figura 2 – Posicionamento dos extensômetros na placa (McCarthy et al., 2005).

Ireman (1998) também utiliza extensômetros situados no plano de cisalhamento de um pino em uma ligação de alumínio. Os extensômetros situados na vizinhança do furo ficaram dispostos em uma área triangular. Nas posições D e E ficaram situados extensômetros com finalidade de captar alguma excentricidade no trajeto da carga de tração aplicada na ligação. Essas observações são apresentadas na Figura 3.a e 3.b. A deformação sobre o furo da ligação foi medida por meio de braços de metal com extensômetros fixados, conectados à placa do alumínio em ambos os lados da ligação, conforme Figura 3 (a).

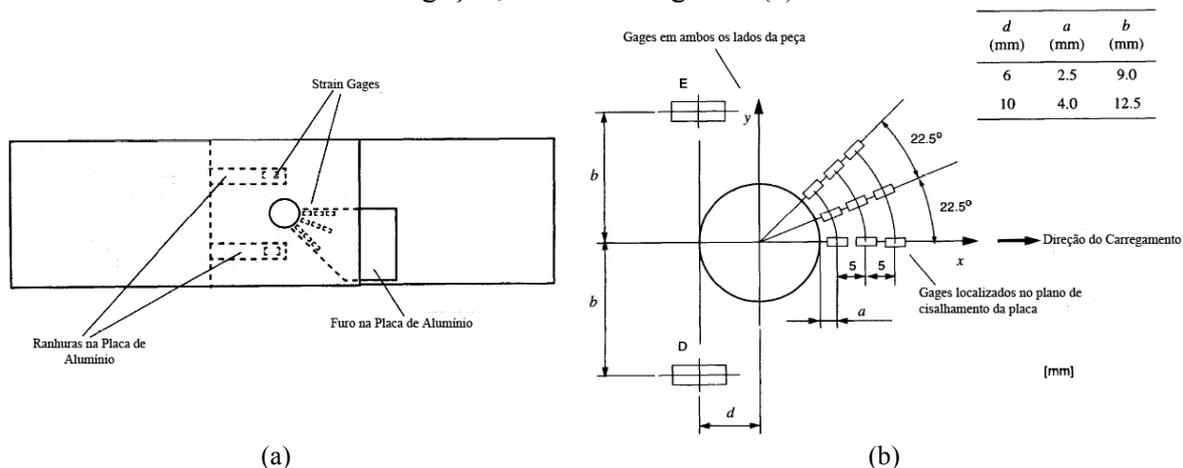


Figura 3 – a) Instrumentação da placa; b) Posicionamento dos extensômetros (Ireman, 1998).

Uma série de pesquisas, como as de Persson et al. (1998) e Dano et al. (2006), também ocuparam-se do estudo da distribuição de tensão em torno de furos carregados pelos pinos, em ligações de materiais compósitos. As Figuras 4 e 5 mostram a forma que os extensômetros estão dispostos nas placas das ligações, respectivamente. Vale ressaltar, que essas pesquisas

citadas anteriormente seguem a mesma metodologia científica que se utiliza atualmente nos estudos de cisalhamento em parafusos ou pinos, segundo a literatura internacional.

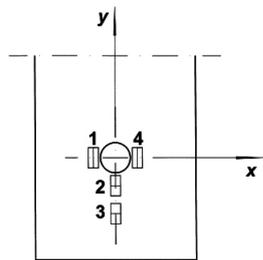


Figura 4 – Instrumentação com extensômetros
(Persson et al., 1998).

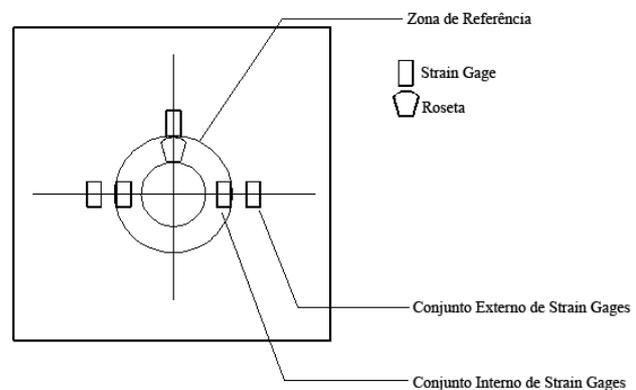


Figura 5 – Instrumentação com extensômetros
(Dano et al., 2006).

Na metodologia apresentada anteriormente se faz necessário associá-la a um estudo analítico ou numérico, ou associá-la a essas duas técnicas, para se ter um bom entendimento do comportamento da tensão nas regiões próximas da cabeça de parafusos ou pinos, e do desenvolvimento de deformações nos pontos instrumentados com extensômetros. Dessa forma a técnica utilizada para essa avaliação se configura em um método híbrido.

3-METODOLOGIA DE PESQUISA

Os modelos experimentais são utilizados na observação do comportamento global das ligações, gerando também resultados de controle para os modelos numéricos. Os resultados experimentais se referem à força de tração atuante nos parafusos, a deformação global do sistema, deformações localizadas em pontos estratégicos na chapa do flange do perfil T e observação dos estados limites últimos. Já os modelos numéricos são utilizados na fase de estudo dos esforços cortantes entre furo e fuste do parafuso.

As chapas dos flanges dos perfis possuem espessuras de 6,3, 8,0 e 10,0 mm, e as almas têm espessura fixa de 12,7 mm. Para união entre alma e o flange do perfil é empregada uma solda de 6 mm, considerando-se o mesmo material do perfil. Os furos possuem diâmetro de 14 mm, sendo que os procedimentos adotados para furação estão de acordo com os espaçamentos máximos e mínimos exigidos pelo Projeto de Revisão da norma ABNT NBR 8800 (2008). Os parafusos usados possuem diâmetro de 12,7 mm e 114,3 mm de comprimento. Em todas as ligações descritas anteriormente, os parafusos foram submetidos a um aperto de 5 kN. As características dos modelos estão expressas na Tabela 1 e Figura 6.

Tabela 1 – Características das Ligações para análise experimental e numérica

Grupos de Ligações	Furos		Espessura (t_f)	
	Quantidade	Diâmetro		
CD1	2	14 mm	1/4 "	6,3 mm
CD2			5/16 "	8.0 mm
CD3			3/8 "	10 mm

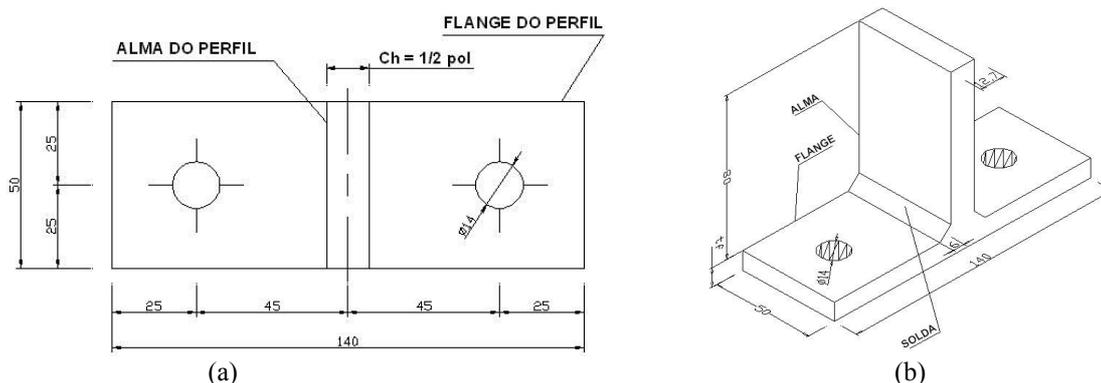


Figura 6 – a) Esquema de furação das ligações; b) Geometria das Ligações estudadas.

Para a realização do estudo híbrido da força de cisalhamento dos parafusos, foi criado um modelo numérico para a análise da distribuição de deformações superficiais no flange do perfil, a sua geometria representa a metade da chapa de aço que constitui o flange do perfil T, conforme a Figura 7. O modelo numérico foi ajustado a partir dos resultados experimentais de deslocamento global do perfil e da deformação superficial medida em pontos situados no flange do perfil T.

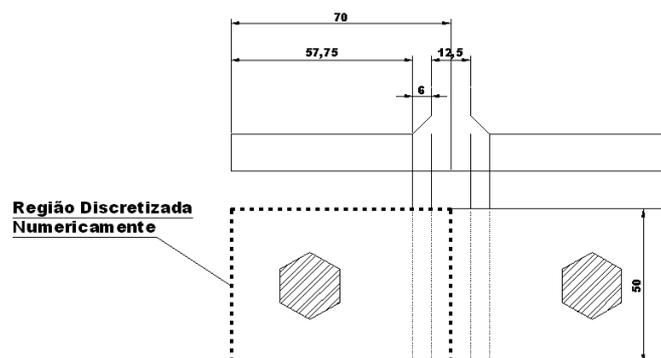


Figura 7 – Representação da geometria da região discretizada numericamente.

3.1-Estudo experimental

Na realização do programa experimental foi utilizado um conjunto de equipamentos integrados, dispostos na Figura 8 e 9, sendo eles respectivamente: prensa hidráulica com capacidade para 60 ton, receptor e codificador de dados *Spider8*, computador para aquisição de dados e base rígida para ensaio das ligações T. Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB).

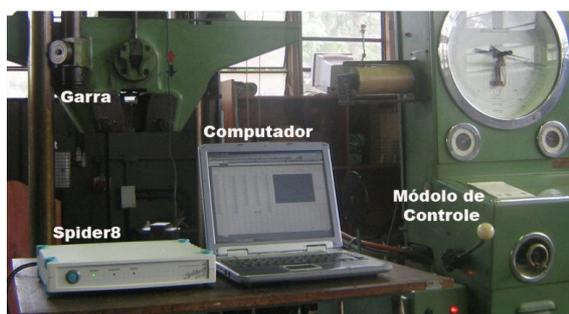


Figura 8 – Equipamentos utilizados.



Figura 9 – Base rígida.

A Figura 10 apresenta o esquema de ensaio das ligações, no qual se utilizou célula de carga para medição do carregamento no parafuso e deformação total do perfil. A ligação foi instrumentada com dois extensômetros elétricos de resistência (extensômetros), com o objetivo de se extrair os dados de comparação ao modelo numérico, obtendo assim informações suficientes para construção de um modelo híbrido numérico-experimental, para estudo do cisalhamento dos parafusos. A célula de deformação tipo viga elástica é utilizada para medir a deformação total do perfil, e a célula cilíndrica tem a função de medir a carga do parafuso. As posições dos extensômetros na superfície da chapa, que compõe o flange do perfil T, são mostradas na Figura 11.

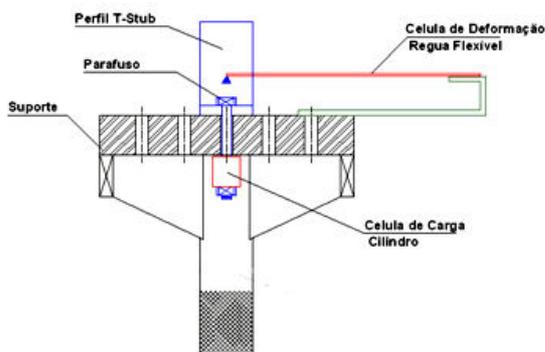


Figura 10 – Esquema de ensaio.

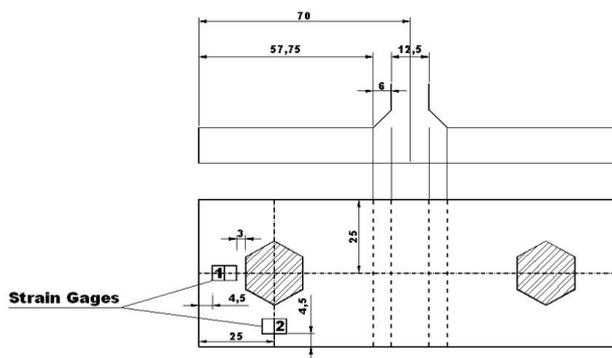


Figura 11 – Locação dos Extensômetros na superfície do flange da ligação T.

3.2-Estudo híbrido numérico-experimental

O modelo numérico adotado para a análise híbrida do cisalhamento recebeu uma discretização refinada nos dois pontos de mapeamento do flange, como mostra a Figura 12 e 13. Essa medida teve a finalidade de proporcionar um maior número de pontos na região discretizada para captura das deformações, possibilitando uma maior aproximação aos dados medidos nos ensaios experimentais. O modelo numérico representa a metade do flange da ligação T e tem o objetivo de simular o efeito de flexão e a pressão na parede do furo. Foi utilizado o valor médio dos resultados dos ensaios de tensão-deformação, obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais, como entrada de dados aos modelos numéricos, caracterizando a não-linearidade física dos modelos.

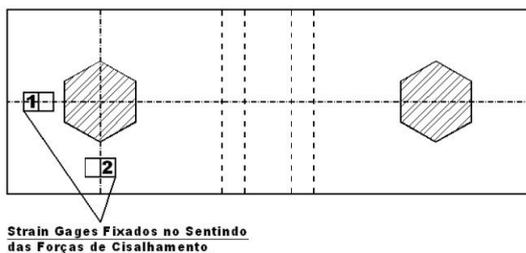


Figura 12 – Mapeamento do flange da ligação T com extensômetros.

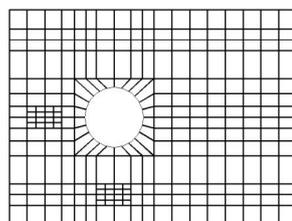


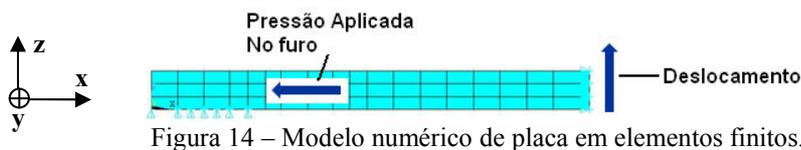
Figura 13 – Modelo numérico de placa em elementos finitos.

Nos estudos numéricos, para aplicação da pressão na face interna do furo (Figura 13), se utilizou duas formulações teóricas para distribuição de pressão em um orifício circular. A distribuição da pressão ao redor do furo é expressa pelas seguintes equações senoidais:

$$P = 4p[\text{sen}(\theta/\pi)] \quad (1)$$

$$P = -p_0 \text{sen}\left(\pi \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}\right) \text{ para } \theta \in [\theta_1, \theta_2] \quad (2)$$

Além da pressão interna no furo, representada pela equação 1 e 2, segundo Echavarría et al., 2007 e Grüber et al., 2006, respectivamente, foram aplicados deslocamentos em forma de passos de carga, no eixo Z do modelo, com intuito de simular o deslocamento que a alma provoca no flange do perfil, como mostra a Figura 14. Os deslocamentos aplicados são baseados nos dados médios de deslocamento do flange obtidos nos ensaios experimentais. Dessa forma, o modelo de placa se caracteriza por passos de carga múltiplos, aplicados em forma de pressão no furo e deslocamento da chapa, de forma simultânea.



A região do plano XY no modelo numérico de chapa, que representa a área de contato do flange do perfil T com a base rígida, recebeu restrições nodais de translação na direção Y e na direção Z, representando de forma conservadora a região de apoio com a base rígida. O plano YZ, localizado na região onde estaria fixada a alma do perfil T, recebeu restrições nodais de translação nas direções X e Y, permitindo movimentos dessa face apenas no eixo Z. Dessa forma, essa translação livre em Z representa o deslocamento da alma da ligação T.

Por meio dos dados de deslocamento total e deformação superficial do flange, obtidos nos ensaios experimentais, foi possível montar o estudo híbrido numérico-experimental, o qual se baseou na alteração de uma pressão aplicada dentro do furo da placa até a maior aproximação possível da curva de deformação dos pontos do modelo numérico a curva obtida na leitura do gages superfícies dos flanges do ensaio experimental, mantendo o mesmo deslocamento do flange obtido no ensaio experimental, conforme mostra a Figura 15.

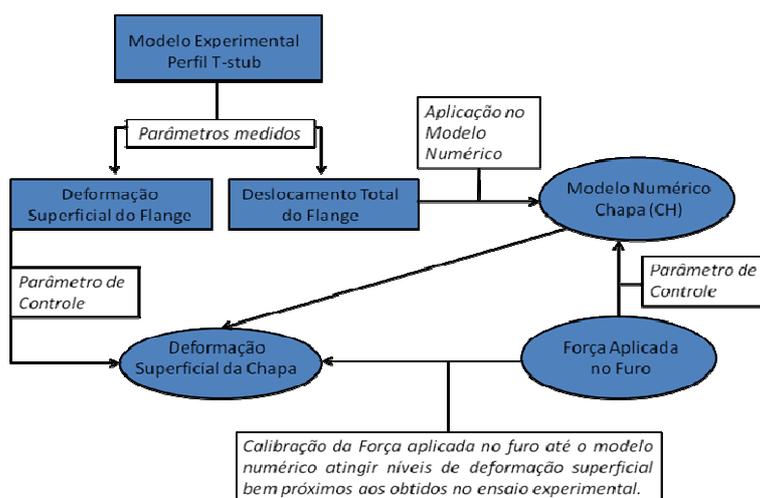


Figura 15 – Esquema do estudo híbrido numérico-experimental utilizado na pesquisa.

4-RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As ligações são investigadas considerando seu comportamento global, por meio das curvas força-deslocamento, as deformações em regiões localizadas no flange do perfil e força de tração nos parafusos. Os resultados para os grupos de ligações CD1, CD2 e CD3 são apresentados a seguir, por meio das médias entre três corpos-de-prova ensaiados, calculadas para cada grupo. O fluxograma apresentado a seguir, na Figura 16, resume o programa experimental.

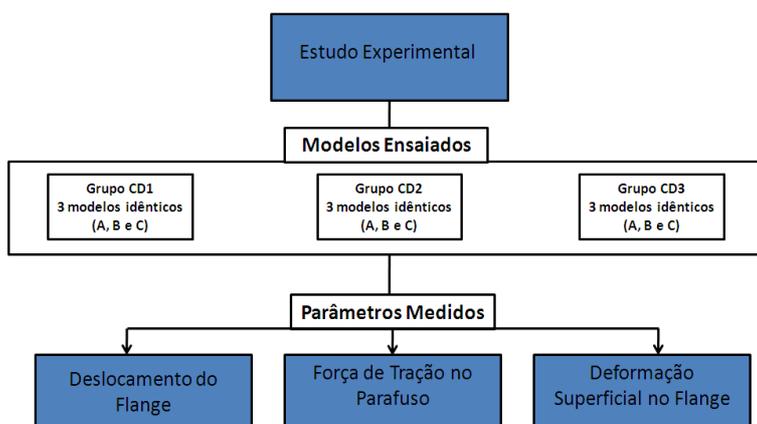


Figura 16 – Fluxograma representativo do programa experimental.

4.1-Resultados para o grupo CD1 – Ligação com flange de 1/4”

Os resultados para o grupo CD1 (Figura 17) mostram que a relação entre carga aplicada e reação nos parafusos, obteve um comportamento relativamente uniforme durante todo período de ensaio. As curvas que expressam as reações médias nos parafusos indicam similaridade nos valores das forças, demonstrando uma boa distribuição de carga nas ligações.

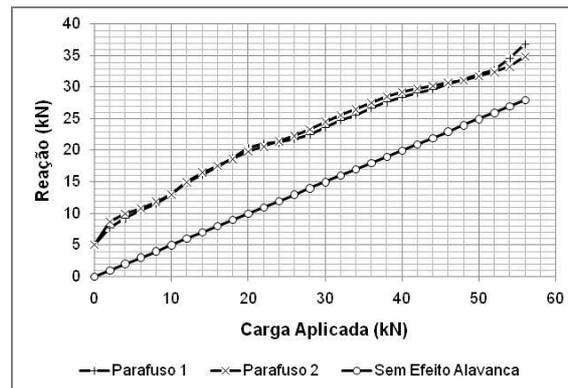


Figura 17 – Relação entre carga aplicada e reação nos parafusos (grupo CD1).

Na Figura 18, pode-se observar o desenvolvimento das forças atuantes na ligação, juntamente com o deslocamento total do sistema. O gráfico mostra um aumento significativo da curva “Reação Total nos Parafusos”, em relação à curva “Carga Aplicada”, demonstrando a grande importância da consideração do efeito alavanca para o dimensionamento de ligações tipo T. A maior espessura do flange do perfil do grupo CD1 proporciona um acréscimo de resistência da ligação, e conseqüentemente uma maior sollicitação nos parafusos, em razão de reações mais elevadas.

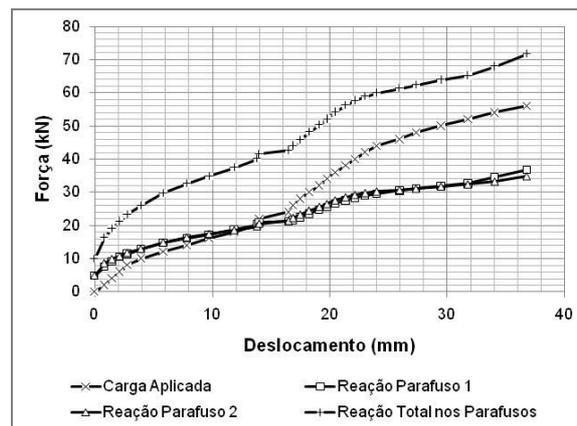


Figura 18 – Relação entre deslocamento e forças no ensaio (grupo CD1).

As deformações lidas pelos Extensômetros (ponto 1), indicam que houve um predomínio de deformação positiva até os 30 kN aplicados no perfil, e a partir desse momento, as leituras passam a ser negativas, indicando o predomínio do contato entre fuste do parafuso e furo. As deformações para os pontos 1 e 2 são mostradas na Figura 19 e 20, respectivamente.

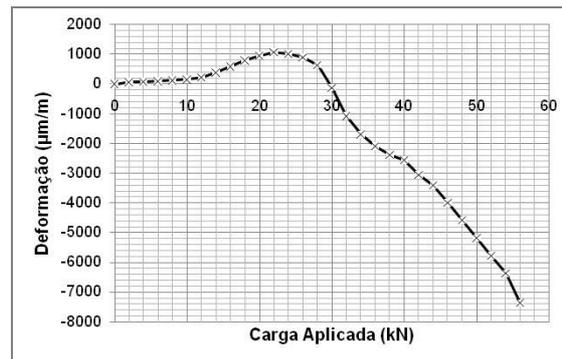


Figura 19 – Carga aplicada vs deformação específica no ponto 1 (grupo CD1).

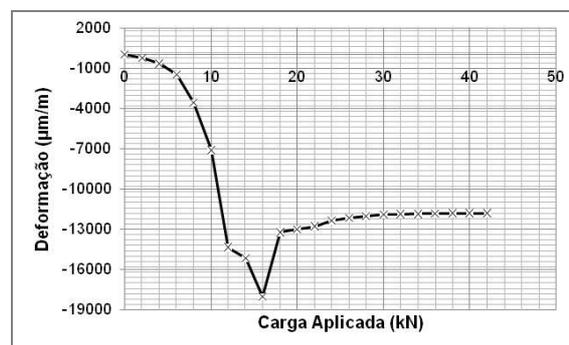


Figura 20 – Carga aplicada vs deformação específica no ponto 2 (grupo CD1).

4.2-Resultados para o grupo CD2 – Ligação com flange de 5/16”

Os resultados apresentados na Figura 21 mostram que houve excentricidade na distribuição das forças no sistema durante o ensaio, no período entre 8 kN a 40 kN de carga aplicada na ligação T, a qual provocou forças desiguais nas reações dos parafusos. Com o aumento de carga na ligação, os valores médios se aproximaram, indicando que os efeitos de plasticidade na ligação foram acompanhados com uma reordenação da distribuição das forças em todo o sistema.

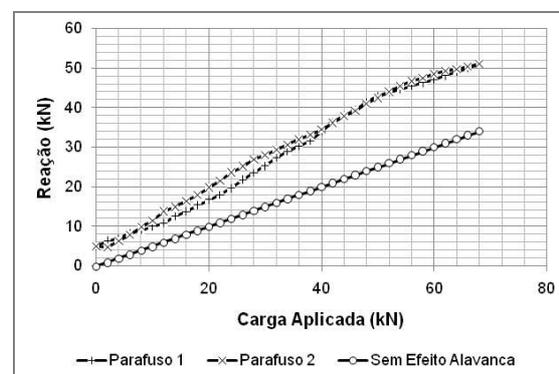


Figura 21 – Relação entre carga aplicada e reação nos parafusos (grupo CD2).

Na Figura 22 apresenta-se um acréscimo de cerca de 30 kN, na média da leitura final das ligações do grupo CD2, em relação ao grupo CD1. Considerando que as forças nos parafusos chegaram ao patamar de 50 kN, gerando uma tensão de 395 MPa nos mesmos. Considerando

que a tensão média de escoamento do sistema parafuso-porca, obtida nos ensaios de caracterização, foi de aproximadamente 400 MPa, para o flange de 5/16" ensaio houve rigidez suficiente para levar os parafusos ao patamar de escoamento.

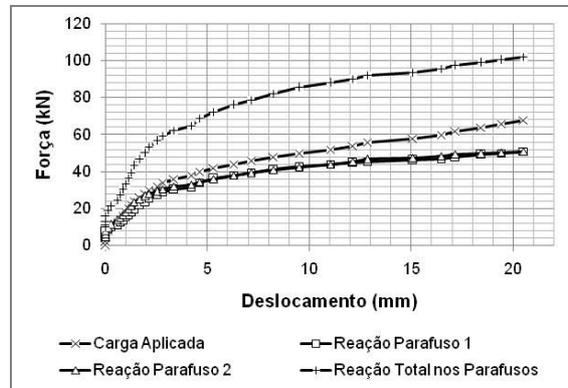


Figura 22 – Relação entre deslocamento e forças no ensaio (grupo CD2).

O gráfico apresentado na Figura 23, indica que o extensômetro situado no ponto 1, para o grupo CD2, manteve o mesmo comportamento do grupo anterior (CD1), com as mesmas grandezas de deformações e forças, com diferença no início de deformações negativas, que se iniciaram a partir de 48 kN, aplicados na ligação.

Na Figura 24, mostra-se que o extensômetro situado no ponto 2, obteve valores de deformações e forças na mesma ordem de grandeza do grupo CD1. Os valores de deformações negativas predominantes nos dois pontos (1 e 2), para os valores médios do grupo CD2, constata-se que há predominância dos efeitos de contato entre furo e fuste do parafuso.

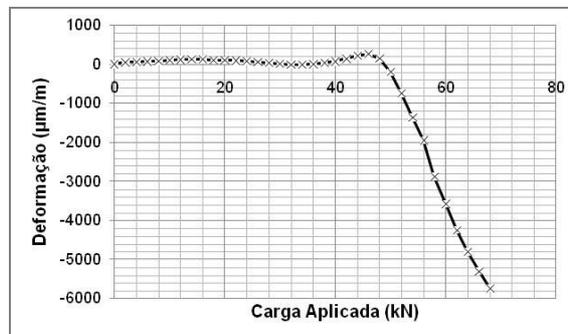


Figura 23 – Carga aplicada vs deformação específica no ponto 1 (grupo CD2).

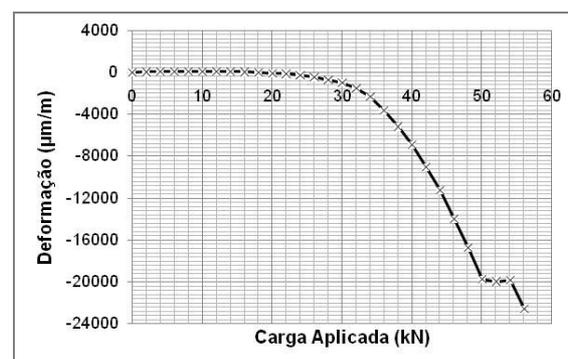


Figura 24 – Carga aplicada vs deformação específica no ponto 2 (grupo CD2).

4.3-Resultados para o grupo CD3 – Ligação com flange de 3/8”

No grupo CD3, obteve-se valores médios para reação nos parafusos, acima do limite de escoamento do sistema parafuso-porca, atingindo tensões de até 435 MPa. No gráfico apresentado na Figura 25 evidencia o escoamento dos parafusos. Uma inspeção visual do colapso das ligações mostrou para o grupo CD3, a existência de escoamento do fuste e da região com rosca de alguns parafusos.

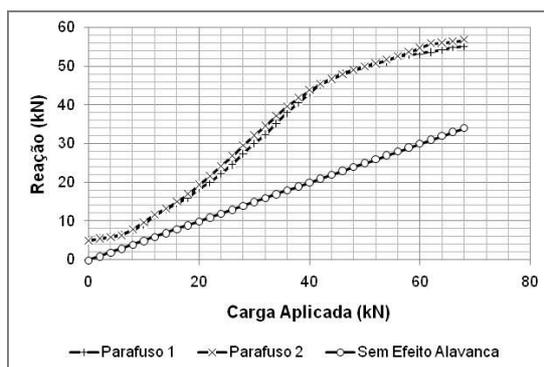


Figura 25 – Relação entre carga aplicada e reação nos parafusos (grupo CD3).

No gráfico apresentado na Figura 26 constata-se novamente que o aumento da rigidez da ligação T, por meio da mudança da espessura do flange, provoca grandes acréscimos de cargas de reação nos parafusos. Os valores médios de reação nos parafusos, para o grupo CD3, aproximam-se da carga aplicada na ligação, caracterizando a presença efetiva do efeito alavanca.

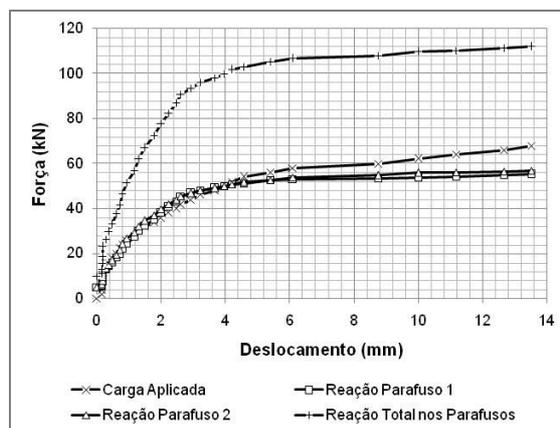


Figura 26 – Relação entre deslocamento e forças no ensaio (grupo CD3).

Em virtude da maior rigidez do grupo CD3, devido ao flange mais espesso, as deformações indicadas pelo extensômetro 1, no ponto 1, mantiveram-se numa ordem de grandeza bastante inferior aos grupos ensaiados anteriormente, como ilustrados na Figura 27. Isto mostra claramente a influência da rigidez do flange no contato com o fuste do parafuso, no ponto onde a deformação foi captada. Os resultados médios para o extensômetro 2 obtiveram o mesmo comportamento que o grupo CD2, evidenciando que a principal influência nas deformações nessa região, é a flexão da chapa do flange, como visto na Figura 28.

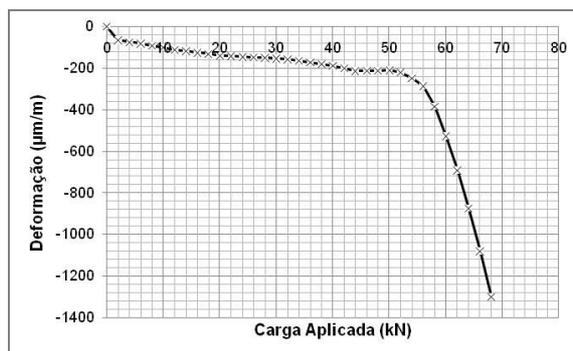


Figura 27 – Carga aplicada vs deformação específica no ponto 1 (grupo CD3).

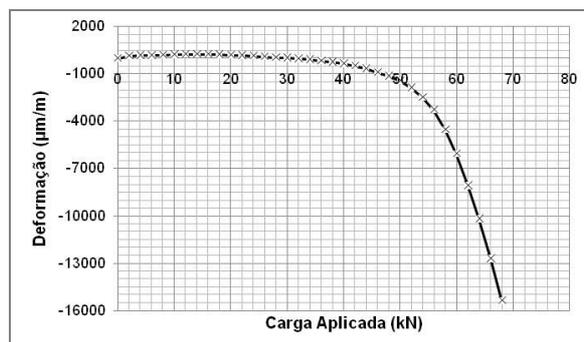


Figura 28 – Carga aplicada vs deformação específica no ponto 2 (grupo CD3).

5-RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados numéricos estão divididos em quatro casos, caracterizados pela combinação das curvas elastoplásticas e função de carregamento no furo (cisalhamento). O caso 1 corresponde à combinação da Curva Elastoplástica Multilinear e a Equação 1 para carregamento do furo. No caso 2 aplica-se a Equação 1 para carregamento do furo e a Curva Elastoplástica Bilinear. Para o caso 3 tem-se a Curva Elastoplástica Multilinear e Equação 2 para carregamento do furo, e caso 4 com Curva Elastoplástica Bilinear e Equação 2.

5.1-Resultados para o grupo CH1

Para o grupo CH1, nos ensaios experimentais, a deformação máxima de compressão em módulo foi igual a 7364,83 µm/m. As deformações impostas pela “Equação 1” ficaram mais próximas dos valores experimentais, com uma deformação final igual a 7503,03 µm/m, em módulo. Na Equação 2 obteve-se a deformação máxima de 7945,05 µm/m. A mudança de curva elastoplástica não provocou mudanças no estudo. A carga máxima aplicada foi 21 kN, dividida em 20 passos de cargas crescente até o valor máximo. O gráfico a seguir, na Figura 29, indica a curva deformação-cisalhamento para o grupo CH1.

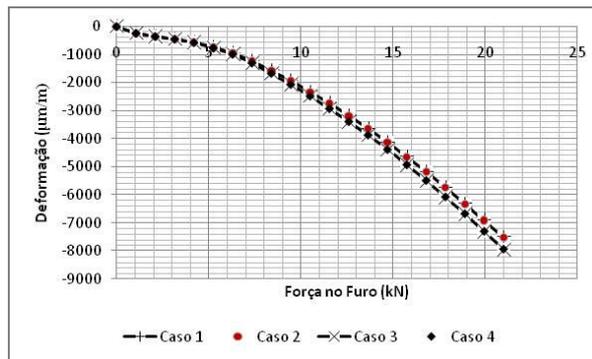


Figura 29 – Curva deformação-força no furo para o grupo CH1.

Nos ensaios experimentais, para o grupo CD1 obteve-se um deslocamento máximo de aproximadamente 36 mm, que foi utilizado como entrada de dado na análise numérica. Foi aplicado um deslocamento máximo de 36 mm nos modelos de chapa, dividido em 20 passos de carga subseqüentes de forma crescente até atingir o valor máximo. Os mesmos são aplicados de forma simultânea à carga aplicada no furo, dando a característica de passos de carga múltiplos ao modelo. Na Figura 30 é colocada a curva deformação-deslocamento para o grupo CH1.

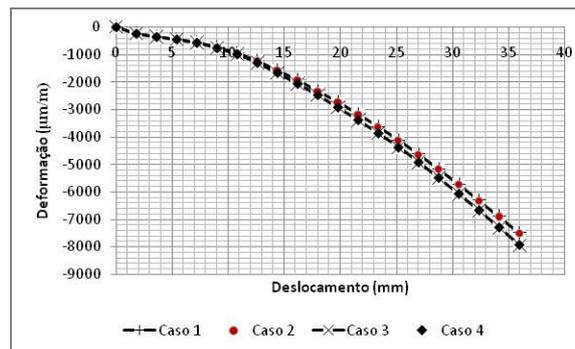


Figura 30 – Curva deformação-deslocamento para o grupo CH1.

5.2-Resultados para o grupo CH2

Nesse grupo, aplicou-se uma carga máxima no furo de 19 kN (cisalhamento), dividida em passos de carga crescentes. A deformação máxima de compressão em módulo para o modelo que usa a Equação 1 foi de 8825,58 µm/m, e com a mudança de equação, a deformação máxima elevou para 9583,8 µm/m, como visto na Figura 31. Sabendo que a deformação máxima em módulo, medida no ensaio experimental nos ensaios do grupo CD2, foi 7985 µm/m, novamente observa-se que os modelos com a aplicação da Equação 1, tem uma maior aproximação as deformações medidas nos ensaios experimentais.

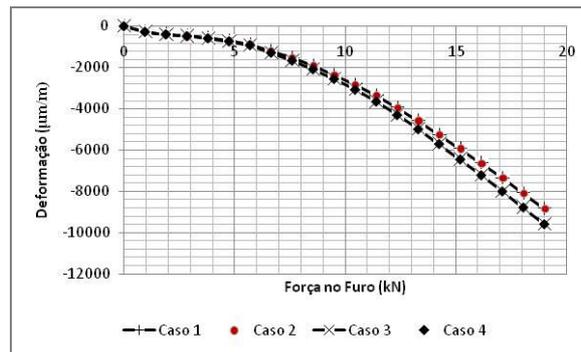


Figura 31 – Curva deformação-força no furo para o grupo CH2.

Os deslocamentos foram aplicados em passos de carga crescentes com um deslocamento máximo de 24 mm, aproximadamente o mesmo deslocamento máximo medido nos ensaios experimentais do grupo CD2. A Figura 32 mostra o desenvolvimento da deformação em função do deslocamento.

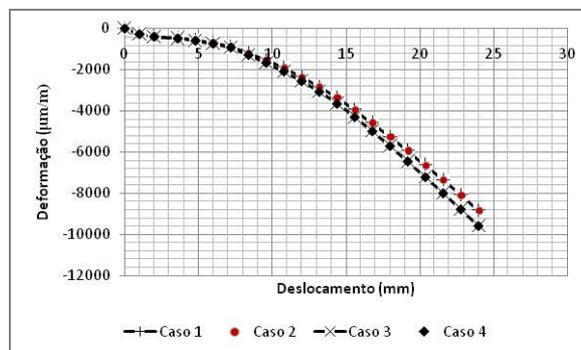


Figura 32 – Curva deformação-deslocamento para o grupo CH2.

5.3-Resultados para o grupo CH3

O grupo CH3 recebeu carregamento máximo no furo de 13 kN, que foi dividido em passos de carga crescente, até esse valor máximo. Em razão da maior rigidez, a deformação medida reduziu bastante em relação aos modelos anteriores.

Para este grupo obteve-se deformação máxima igual a 1904,07 $\mu\text{m/m}$ com o uso da Equação 1 e 2142,59 $\mu\text{m/m}$ com a utilização da Equação 2, como pode ser observado na Figura 33. A deformação máxima foi 1826,04 $\mu\text{m/m}$, para os ensaios experimentais do grupo CD3.

O deslocamento máximo medido nos ensaios experimentais do grupo CD3 foi de aproximadamente 15 mm, dividido em 20 passos de carga crescentes para o estudo numérico do grupo CH3, como exposto na Figura 34.

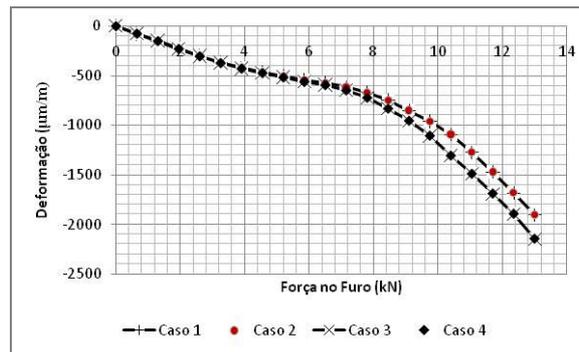


Figura 33 – Curva deformação-força no furo para o grupo CH3.

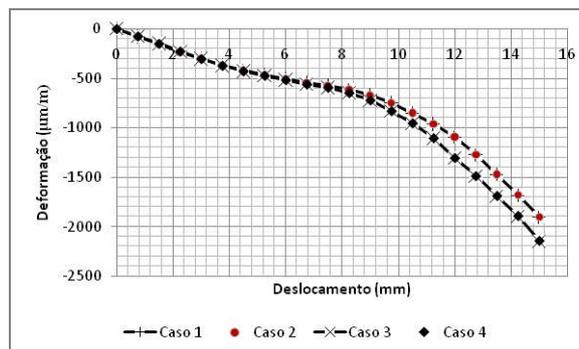


Figura 34 – Curva deformação-deslocamento para o grupo CH4.

6-ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando a curva experimental que representa o grupo CD1, ligações que possuem flange com 6,3 mm de espessura, nota-se que novamente houve predominância de deformações positivas até os 19 mm de deslocamento das ligações, como pode ser visto na Figura 35. Apesar disto, as deformações negativas se aproximaram de forma considerável aos valores obtidos pelo modelo numérico CH1. A curva numérica para o modelo CH1 é correspondente ao caso 1 com carga de 21 kN aplicada no furo. Nos ensaios experimentais do grupo CD1 não ocorreu ruptura dos parafusos.

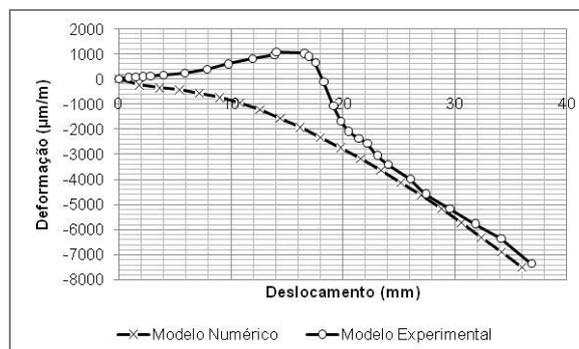


Figura 35 – Relação deformação-deslocamento para o modelo numérico CH1 e os modelos experimentais do grupo CD1.

A partir do grupo CD2, ligações com flange de 7,9 mm, as leituras das deformações passam a ser predominantemente negativas. Lembrando que a partir desse grupo, os parafusos começam a romper por cisalhamento combinado com tração, nos ensaios experimentais. A

curva experimental tem uma boa aproximação ao comportamento da curva numérica referente ao modelo CH2 caso 1, para carga máxima de 19 kN no furo. A seguir, na Figura 36, são apresentadas a curva experimental do grupo CD2 e a curva numérica do grupo CH2, para a relação deslocamento-deformação no ponto de mapeamento.

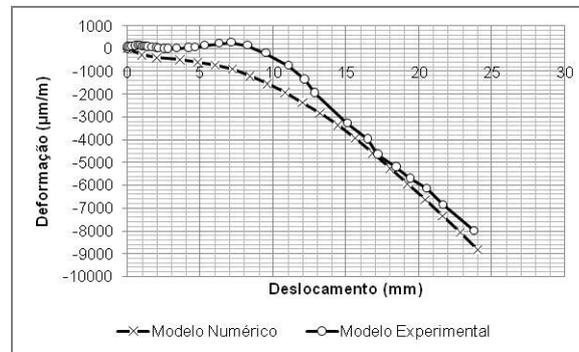


Figura 36 – Relação deformação-deslocamento para o modelo numérico CH2 e os modelos experimentais do grupo CD2.

Na curva deformação-deslocamento para o modelo numérico CH3, obteve-se um comportamento com as mesmas características da curva experimental, com aplicação de uma carga de 13 kN no furo. Nos ensaios experimentais do grupo CD3, houve ruptura dos parafusos por cisalhamento combinado com tração, mostrando que a curva experimental representa bem o contanto que ocorre entre a parede do furo e o fuste do parafuso, gerando assim a força de cisalhamento no fuste, e conseqüentemente compressão na região de instrumentação, provocando deformações negativas. A boa aproximação das duas curvas indica que a metodologia utilizada tem uma boa aplicabilidade para situações em que o efeito predominante é o contato entre parede do furo e parafuso, como mostra a Figura 37.

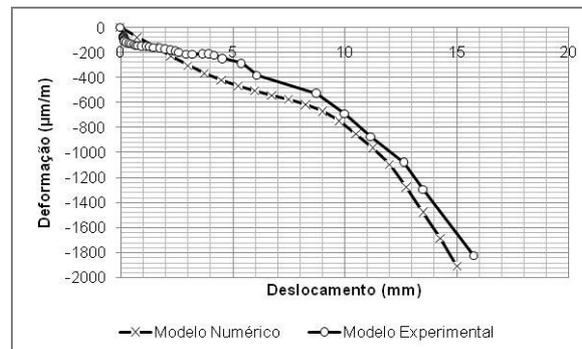


Figura 37 – Relação deformação-deslocamento para o modelo numérico CH3 e os modelos experimentais do grupo CD3.

7-CONCLUSÕES

De forma geral, conclui-se que há um efeito combinado entre tração e cisalhamento solicitando os parafusos das ligações T. Os dois efeitos combinados diminuem a capacidade resistente dos parafusos e podem causar o colapso dos parafusos repentinamente, antes dos mesmos atingirem o limite de resistência a tração. Em algumas situações, em razão de haver apenas a consideração do efeito de tração para o dimensionamento de ligações tipo-T, as mesmas podem ter uma resistência inferior a aquela especificada em projeto.

Finalmente ressalta-se que, o problema estudado nessa pesquisa merece mais aprofundamento, pois nessa pesquisa se utilizou uma metodologia nova para o estudo de ligação T fixada em base rígida – o que se aproxima mais da realidade. O uso da fixação em base rígida expõe uma mudança substancial no mecanismo de ruptura dos parafusos revelando o efeito combinado entre tração e um significativo cisalhamento no mecanismo de ruptura. Para que o problema seja entendido de forma ampla, devem-se realizar novas pesquisas experimentais que avaliem como foram as rupturas dos parafusos e onde ocorreram, a combinação de tração e compressão, efeitos na cabeça do parafuso e a mordida do corpo do parafuso e na chapa, além de se utilizar um modelo numérico que represente a ligação T o mais próximo dos modelos ensaiados experimentalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. *NBR 8800 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro.
- Dano, M.L., Kamal, E. & Gendron, G., 2006. *Analysis of bolted joints in composite laminates: Strains and bearing stiffness predictions*. Composite Structures.
- Da Silva, W.A., 2008. *Avaliação Híbrida Numérica-Experimental do Cisalhamento em Parafusos de Conexões Metálicas Tipo T*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Echavarria, C., Haller, P. & Salenikovich, A., 2007. *Analytical study of a pin-loaded hole in elastic orthotropic plates*. Composite Structures, Vol. 79, p.107–112.
- Freitas, C.A.S., 2005. *Estudo experimental, numérico e analítico do efeito alavanca em conexões metálicas tipo T*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Grüber, B., Hufenbach, W., Kroll, L., Lepper M. & Zhou B., 2006. *Stress concentration analysis of fibre-reinforced multilayered composites with pin-loaded holes*. Composites Science and Technology.
- Ireman, T., 1998. *Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints*. Composite Structures, Vol. 43, p.195-216.
- Maggi, Y.I., 2004. *Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida*. Tese de Doutorado, Escola de engenharia de São Carlos, USP.
- McCarthy, M.A., McCarthy, C.T. e Stanley, W.F., 2005. *Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I – model development and validation*. Composite Structures, Vol. 71, p.140–158.
- Persson, E., Madenci, E. e Eriksson, I., 1998. *Delamination initiation of laminates with pin-loaded holes*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 30, p.87-101.