



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Análise das Tensões de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio Brenda Vieira Costa Fontes¹, Luciano Mendes Bezerra², Valdeir Francisco de Paula³

¹Universidade de Brasília / brendavcf94@gmail.com

²Universidade de Brasília / lmbz@unb.br

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás / brendavcf94@gmail.com

Resumo

Este trabalho é um estudo numérico das tensões de cantoneiras de aço formadas a frio, conectadas por parafusos e sob carga de tração, focando na análise das tensões ao redor dos furos, estudo pouco realizado entre os pesquisadores. Devido à conexão parafusada, a cantoneira não se deforma uniformemente, surgindo então um fenômeno conhecido como shear lag, o qual reduz a capacidade resistente da cantoneira. Com o intuito de verificar o comportamento de cantoneiras formadas a frio com conexões parafusadas, submetidas à tração, foram modeladas diversas cantoneiras com a ajuda do pacote comercial de análise por elementos finitos ABAQUS, considerando a não-linearidade geométrica e de material. Foram utilizados os resultados experimentais de Paula (2006) para validar o modelo. Os resultados obtidos na análise numérica foram comparados com resultados de ensaios experimentais, chegando-se a uma boa concordância entre os mesmos. Contudo, constatou-se a viabilidade da modelagem numérica no apoio e complementação das pesquisas experimentais envolvendo perfis de chapas finas, confirmando que os furos mais internos apresentam maiores tensões.

Palavras-chave

Estruturas Metálicas; Cantoneiras; Conexões Parafusadas; Coeficiente de redução da seção líquida; ABAQUS.

Introdução

Com o início da utilização das estruturas metálicas na construção civil no século XVIII até os dias atuais, o aço possibilitou aos engenheiros e arquitetos de todo o mundo construções mais eficientes, arrojadas, ousadas e com alta qualidade.

Hancock (2003) concluiu em sua pesquisa de revisão que desenvolvimentos significativos continuam a ocorrer no projeto de membros e conexões estruturais de aço formados a frio. Isto é de se esperar, uma vez que o crescimento no uso de aço moldado a frio superou significativamente os componentes estruturais de aço laminado a quente, particularmente com o aumento do uso do aço formados a frio em construções residenciais em todo o mundo.

Os perfis de aço formados a frio começam como chapas planas de diversas espessuras, frequentemente com espessuras de até 6,35 mm, segundo Yu (2000), estas chapas são enroladas e prensadas até que ganhem o tamanho e forma desejados.

Atualmente, no Brasil, está em grande uso as construções leves estruturadas em aço, também chamados de *light steel frames* (ou pórticos leves de aço), onde se pode utilizar os perfis de aço formados a frio. Dentre os tipos de conexões, a parafusada apresenta algumas vantagens sobre a soldada, como, por exemplo, a praticidade de execução, permite montagem e desmontagem da estrutura *in loco*, não necessita de fonte energética específica, podendo assim ser usada em qualquer lugar, e é mais resistente sob carregamento alternado. Sendo assim, a conexão é um fator de extrema importância para o bom funcionamento e segurança das estruturas, pois conecta vigas, pilares e contraventamentos.

Um dos perfis mais utilizados para realizar a conexão de peças em aço é o perfil L, também conhecidos como cantoneira, formado a frio, que apresentam extrema importância na estabilidade das estruturas. As cantoneiras são perfis compostos por duas abas simétricas ou não, formando um ângulo de 90 graus, e o efeito *shear lag* é um dos fenômenos que mais influência na resistência da conexão em perfis formados a frio por ligações

parafusadas e sob tração. Tal fenômeno ocorre quando o perfil não é conectado através de todas as suas abas, ocasionando a redução na resistência à tração da peça pela ruptura da seção líquida (PAULA, 2006). Segundo Salmon e Johnson (2009), o fenômeno *shear lag* é uma condição de distribuição de tensões não-uniforme na vizinhança da ligação. A importância do estudo de tensões em conexões metálicas está também associada à importância das mesmas no colapso de estruturas metálicas e estruturas mistas. Mais de 90% dos colapsos em estruturas metálicas ocorrem em conexões (SALMON, 2009). Portanto, o entendimento do campo e dos gradientes de tensões nas conexões é essencial para a segurança das construções. Nota-se ainda que a linha de pesquisa de conexões de aço no programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB) foi recentemente premiada no Congresso IBRACON de 2018, em Foz do Iguaçu, com a melhor tese (BARBOSA, 2016) nesta área em 2018 voltada para conexões em estruturas mistas de aço-concreto. Portanto esta pesquisa vem a colaborar ainda mais com o entendimento dos mecanismos de ruptura e resistência das conexões em aço no PECC/UnB.

Revisão Bibliográfica

Pesquisas experimentais e/ou numéricas são a seguir apresentadas relativas a alguns trabalhos de pesquisadores que consideraram o problema da quantificação da perda de eficiência da seção de uma cantoneira com conexão parafusada em razão do efeito do fenômeno *shear lag*, seja ela em perfil laminado ou formado a frio.

Paula (2006) fez um estudo experimental e numérico de cantoneiras de aço formadas a frio, conectadas por parafusos e sob carga de tração, focando no efeito do fenômeno *shear lag*. A partir de uma análise estatística sobre os dados experimentais, propôs uma nova equação que quantifica a redução da eficiência da seção transversal das cantoneiras. O estudo numérico foi realizado por meio do programa ANSYS, e seus resultados foram satisfatórios. A Figura 1 ilustra um dos casos estudados por Paula (2006), especificamente a cantoneira C141, um perfil 100x100, em aço COR 420, com espessura de 2,25mm e 4 seções de parafusos em uma linha. Nas análises realizadas pelo autor, concluiu-se que a equação prescrita pela norma brasileira destinada ao dimensionamento de perfis formados a frio, a NBR 14.762-2001 (ABNT, 2001), baseada na norma norte-americana AISI-2001 (AISI, 2001) resulta, em um grande número de situações com valores de cargas de ruptura da seção líquida de cantoneiras superiores àqueles efetivamente encontrados nos ensaios realizados. Na citada norma, os modos de falha de esmagamento e de ruptura da seção líquida indicados para cantoneiras, não foram comprovados na maioria dos ensaios, devido, principalmente, à estimativa inadequada da carga de ruptura da seção líquida, tanto para mais como para menos. Portanto, há esta imprecisão a ser estudada na NBR 14.762-2001 (ABNT, 2001).

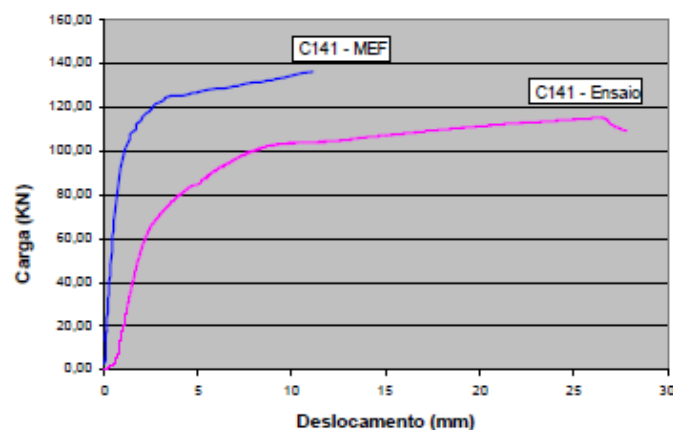


Figura 1 – Curva carga-deslocamento do ensaio e do modelo numérico da cantoneira C141 (PAULA, 2006).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Fasoulakis, Raftoyiannis e Avraam (2017) realizaram análises experimental e numérica em cantoneiras de aço formadas a frio conectadas por parafusos e sob tração ou compressão. A análise numérica foi feita pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o software ABAQUS/CAE (2014). Os citados autores utilizaram um modelo simplificado multilinear com base nos resultados dos experimentos para os parâmetros do material e não consideraram o efeito perfil (ou seja; tensão/tensão residual) oriunda do processo da formação a frio do perfil analisado. Os citados autores adotaram como condições de contorno nós fixos para as bordas externas das placas finais, perpendiculares ao eixo longitudinal da viga. Além disso, 14 interações de contato são consideradas usando elementos de contatos superfície-superfície entre as peças: parafuso-porca-arruela-cantoneira-placa. Os elementos sólidos C3D8R foram selecionados para a simulação das placas finas, porcas, parafusos e arruelas, enquanto os elementos C3D8I foram os preferidos para os elementos angulares. A Figura 2 mostra a configuração do ensaio experimental utilizado, paralelamente e de forma complementar, um modelo de elementos finitos. Na figura é possível observar a geometria da malha, e a comparação dos resultados obtidos comparando os dados experimentais e numéricos dos modelos C29, C30, C31 e ABAQUS, provando uma boa aproximação entre os resultados.

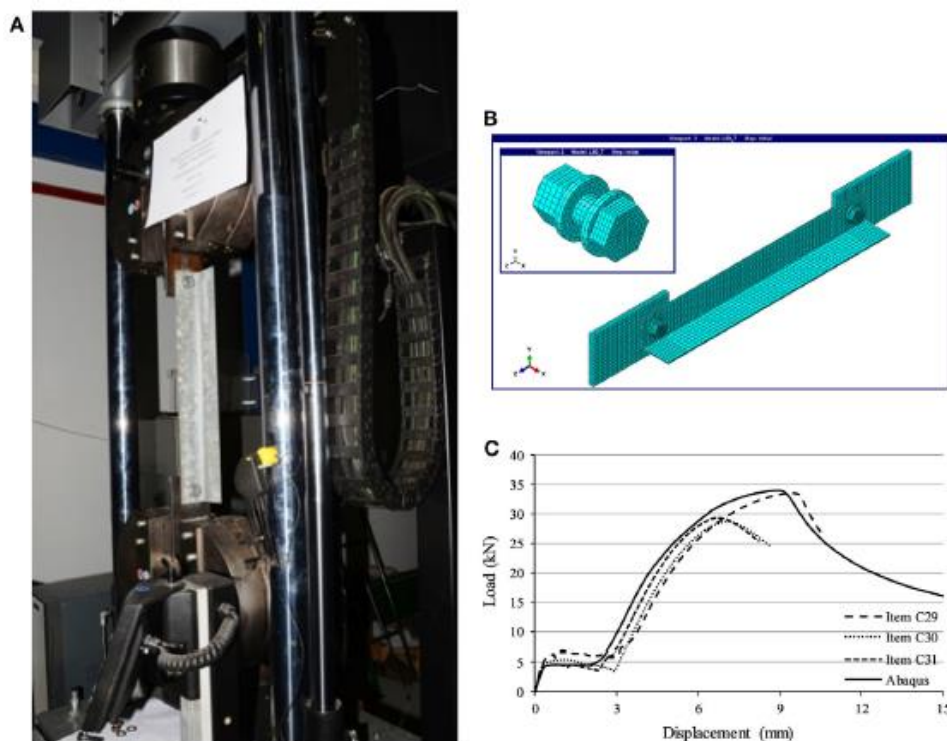


Figura 2 – Visão geral de (A) a configuração do ensaio de tração, (B) modelo do ABAQUS FEM, e (C) comparação de curvas de flambagem experimentais e numéricas para a seção transversal L45 (FASOULAKIS, RAFTOYANNIS, AVRAAM, 2017).

Makesh e Arivalagan (2018) realizaram um estudo numérico pelo método dos elementos finitos utilizando o software ANSYS para simular o comportamento de cantoneiras de aço formadas a frio e sob tração com uma ou duas abas de 2mm de espessura, comparando com resultados experimentais e com normas internacionais. Eles concluíram que as cargas últimas das cantoneiras são entre 10% e 12% menores que todas as prescrições das normas internacionais NAS (2001), AISI (2001), AS/NZS (2005) e BS (1998). Os autores concluíram também que as tensões obtidas na análise de elementos finitos indicam que ocorrem tensões máximas nos orifícios dos parafusos mais internos a partir dos quais as falhas experimentais foram iniciadas.

Modelagem Numérica

Duas cantoneiras de mesmas dimensões, espessura e material foram escolhidas para serem modeladas numericamente. Os modelos experimentais ensaiados por Paula (2006) foram utilizados nesse estudo para a calibração e validação do modelo numérico e se partir para diferentes análises. O experimento modelado foi a simulação de um ensaio de tração em cantoneiras de aço formadas a frio e parafusadas em chapas de fixação, sendo a carga aplicada na extremidade superior da chapa de fixação e a chapa na extremidade inferior foi presa por garras da máquina de ensaio a tração.

Neste trabalho, para o desenvolvimento do modelo numérico de tração em cantoneiras parafusadas, foi utilizado o *software* ABAQUS/CAE. O modelo é composto por uma cantoneira, duas chapas de fixação e a parafusos, onde a quantidade de parafusos varia de acordo com o perfil utilizado.

Os parafusos e as chapas de fixação foram modelados utilizando o elemento C3D8R. Devido à grande concentração de tensões nos furos da cantoneira, a cantoneira foi modelada com o elemento SC6R (elemento plano de casca contínua de prisma triangular de 6 nós e integração reduzida) contido na biblioteca ABAQUS (2014) como *continuum shell*, sendo necessário apenas a redução do tamanho dos elementos mais próximo aos furos. A malha dos elementos no modelo é mostrada na Figura 3.

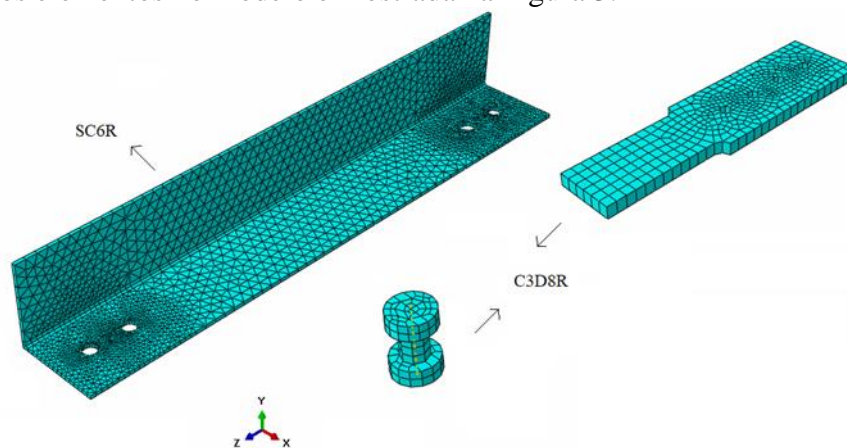


Figura 3 – Malhas e tipos de elementos finitos.

As cantoneiras foram modeladas em aço COR 420, as chapas de fixação em aço SAE 1040 e os parafusos em aço ASTM A325. A modelagem dos aços neste trabalho se concretizará com a utilização de um modelo constitutivo elástico-plástico, com escoamento isotrópico. Este modelo está disponível na biblioteca de materiais do ABAQUS (2014), com a denominação PLASTIC. No modelo constitutivo elástico-plástico a resposta obtida é independente da taxa de deformação. Devido ao comportamento uniaxial implementado no modelo, consistiu na relação tensão-deformação bi-linear para todos os componentes modelados.

Na modelagem, houve interação de contato com a formulação *small sliding*, (pequeno deslizamento) com o método de discretização *surface-to-surface* (face a face), com a propriedade normal *hard* (dura). O contato foi introduzido entre a chapa de fixação e a cantoneira na extremidade da aplicação da carga, e entre o lado esquerdo da parte inferior da cabeça dos parafusos e a parte superior da cantoneira.

Houve restrição tie (amarração) entre as chapas de fixação e o fuste de todos os parafusos e entre o fuste dos parafusos e a cantoneira. Esta providência unifica os deslocamentos dos nós das superfícies envolvidas, desta maneira, o deslizamento entre as superfícies é eliminado, reduzindo muito a deformação da peça.

Para simular a execução do ensaio de tração nas cantoneiras, as chapas de fixação foram restringidas para deslocamentos, podendo apenas transladar na direção Z (longitudinal da peça sob tração) de aplicação da carga. A chapa de fixação travada no aparelho do experimento também foi simulada restringindo qualquer tipo de movimento nessa extremidade.

A aplicação do carregamento foi modelada como uma carga concentrada aplicada na seção transversal da chapa de fixação da extremidade livre tracionando a cantoneira.

Neste estudo, foi aplicado o método de análise estática implícita. Esse método foi escolhido por ser uma modelagem simplificada do ensaio experimental, de modo que poucas variáveis fossem aplicadas e se tornar uma fácil utilização. A carga aplicada na simulação foi feita por meio do método de Riks, o qual usa a magnitude da carga como um adicional desconhecido; resolve simultaneamente para cargas e deslocamentos – para detalhes ver (ABAQUS, 2014).

Resultados da Análise Numérica

Foram modeladas numericamente duas cantoneiras de aço formado a frio, sendo todas de dimensões 80x80 (mm) e espessura de 3,35mm, variando apenas a quantidade de linha de parafusos e de seções de parafusos por linha, sendo a cantoneira B221 com 2 seções de parafusos em uma linha e a cantoneira B222 com 2 seções de parafusos em duas linhas. Estes dois perfis (B221, B222) foram escolhidos por serem peças comumente encontradas na prática e com isso se poder fazer uma análise da influência da variação das tensões quando acrescentada uma segunda linha de parafusos.

A validação (ou sincronização, ajuste) do modelo em elementos finitos desenvolvido foi realizada com os ensaios de tração de Paula (2006).

As curvas carga-deslocamento obtidas pelos ensaios experimentais foram comparadas com as curvas numéricas obtidas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), como visto nas Figura 4 e 5.

A diferença de deslocamento é justificada pela quantidade de restrições tie no modelo, esse tipo de restrição impede qualquer tipo de deslocamento, aumentando muito a rigidez do modelo, o que não acontece no ensaio real. Também, existe acomodação inicial dos perfis aos parafusos durante os ensaios e sensibilidade do transdutor de deslocamento a outras deformações além da deformação estritamente longitudinal (ao longo do eixo Y) e acomodação dos furos.

De qualquer maneira, é de se esperar que o modelo numérico pelo método dos elementos finitos leve a menores deslocamentos, uma vez que os deslocamentos dos ensaios incorporam os deslocamentos ocorridos após a ruptura da seção líquida (abertura da seção por onde passa o parafuso). O ajuste entre as curvas experimentais e numéricas é satisfatório para a análise das tensões e carga última na cantoneira, comprovando a eficiência do modelo de elementos finitos proposto neste estudo.

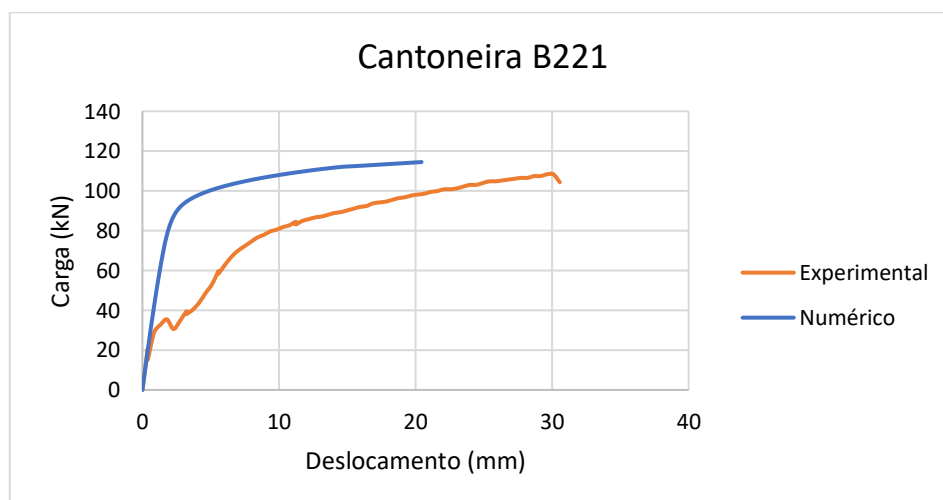


Figura 4 – Curva carga-deslocamento da cantoneira B221 modelada.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

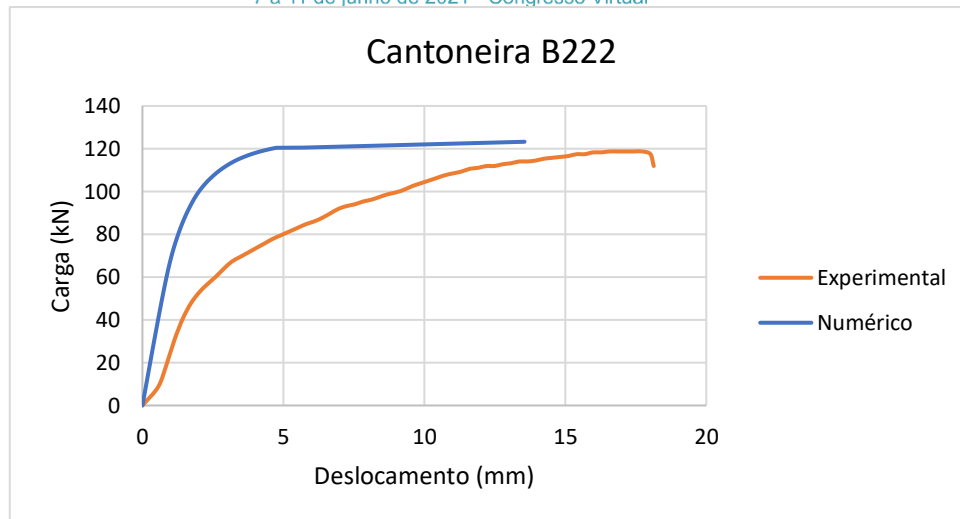


Figura 5 – Curva carga-deslocamento da cantoneira B222 modelada.

A Tabela 1 apresenta as cargas últimas das cantoneiras obtidas pelos ensaios de tração experimentais (P_{exp}) e pela análise de elementos finitos (P_{MEF}). Esses resultados evidenciam a eficácia do modelo de elementos finitos proposto em simular a capacidade resistente das cantoneiras, diminuindo sua precisão com o aumento do número de parafusos.

| Cantoneira | P_{exp} (kN) | P_{MEF} (kN) | P_{exp}/P_{MEF} |
|------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| B221 | 108,31 | 114,47 | 0,95 |
| B222 | 118,72 | 123,25 | 0,96 |
| Média | | | 0,95 |
| Coefficiente de Variação (%) | | | 1,26 |

Tabela 1 – Comparação entre as cargas últimas das cantoneiras obtidas pelos ensaios experimentais e modelo numérico proposto.

A Tabela 2 apresenta as deformações das cantoneiras obtidas pelos ensaios de tração experimentais (D_{exp}) e pela análise de elementos finitos (D_{MEF}). Esses resultados mostram que o modelo numérico é mais rígido que os ensaios experimentais, como justificado acima, aumentando a diferença de deformações com o aumento do número de parafusos.

| Cantoneira | D_{exp} (mm) | D_{MEF} (mm) | D_{exp}/D_{MEF} |
|------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| B221 | 30,57 | 20,44 | 1,5 |
| B222 | 18,14 | 13,55 | 1,34 |
| Média | | | 1,42 |
| Coefficiente de Variação (%) | | | 7,86 |

Tabela 2 – Comparação entre as deformações das cantoneiras obtidas pelos ensaios.

Com observações experimentais dos ensaios de tração, Paula (2006) constatou que o modo de ruptura das cantoneiras de aço formado a frio parafusadas e submetidas a tração consiste em ruptura da seção líquida, equivalente aos modos de falha ocorrido nas simulações numéricas.

As Figura 6 e Figura 7 mostram a distribuição das tensões de Von Mises, nas cantoneiras modeladas no momento do início da carga de ruptura nos bordos dos furos. Os furos centrais são sempre os primeiros a sofrerem o efeito da tração aplicada e são os que mais deformam, observando o início da ruptura por seção líquida devido aos altos valores de tensão concentrados nesse bordo. Confirmando a equivalência entre os modos de ruptura visualizados nos resultados das simulações numéricas e a constatação observada por Paula (2006). Uma das vantagens da análise numérica por EF de experimentos é calibrar o comportamento das espécies testadas em laboratório, tendo segurança nos resultados de outras configurações que não foram sequer testadas.

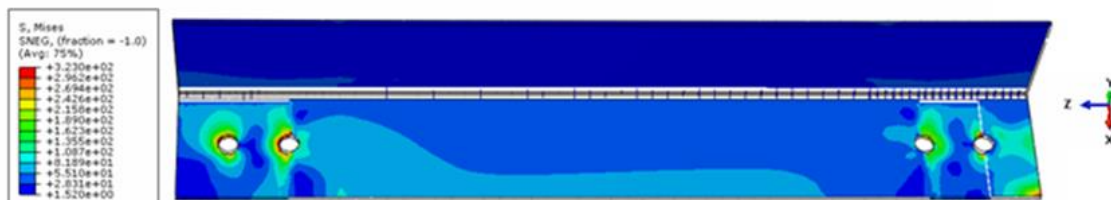


Figura 6 – Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa) no momento do início da ruptura da seção líquida da cantoneira B221.

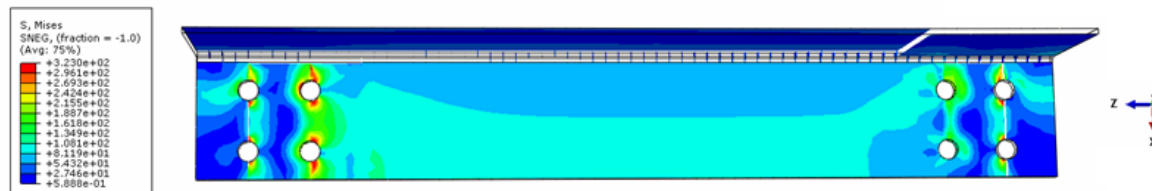


Figura 7 – Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa) no momento do início da ruptura da seção líquida da cantoneira B222.

Comparando as Figura 8 (a, b, c e d), evidencia-se a conformidade entre os modos de ruptura nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas com o modelo proposto. Observa-se a semelhança na deformação das cantoneiras para resultados numéricos e experimentais. Estes resultados demonstram a capacidade do modelo em elementos finitos proposto de simular numericamente o comportamento das cantoneiras de aço formado a frio conectadas por parafusos e submetidas a tração, comprovando o mesmo tipo de ruptura por seção líquida pela perda de capacidade decorrente do efeito shear lag.

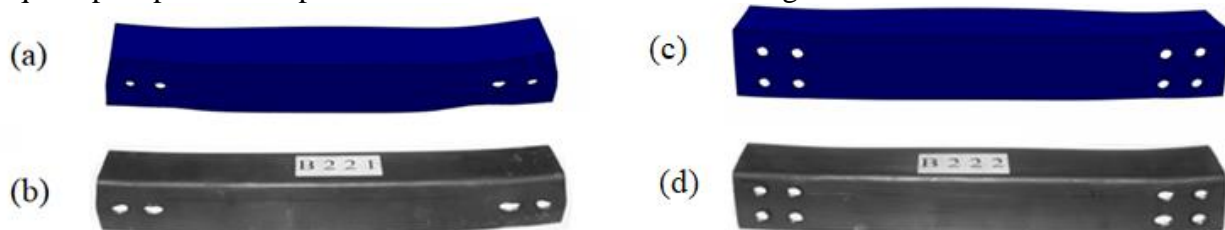


Figura 8 – Deformação numérica (a) e experimental (b) da cantoneira B221 e deformação numérica (c) e experimental (d) da cantoneira B222 no momento de carga última.

Para a cantoneira B221 modelada numericamente, analisando-se a tensão longitudinal no momento da deformação elástica, com carga aplicada de 20kN, temos a distribuição de tensões ao longo da cantoneira (Figura 9).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

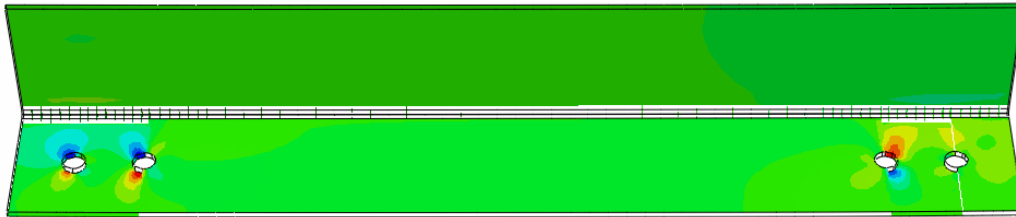


Figura 9 – Tensão longitudinal com 20kN aplicados na cantoneira B221.

De acordo com cada corte (ver linhas interceptando os parafusos nas figuras), foram elaborados os gráficos da distribuição das tensões em cortes verticais (Figuras 10 e 11) e corte horizontal (Figura 12) passando pelos furos.

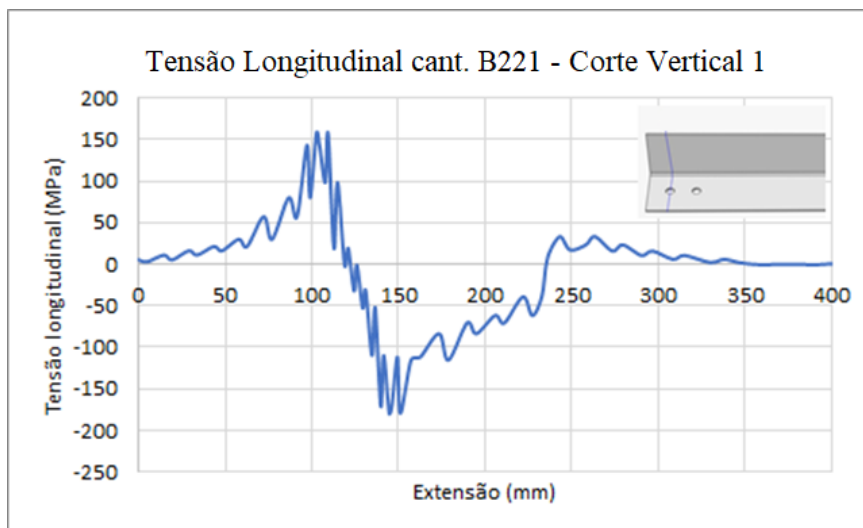


Figura 10 – Tensões no corte vertical 1 na cantoneira B221.

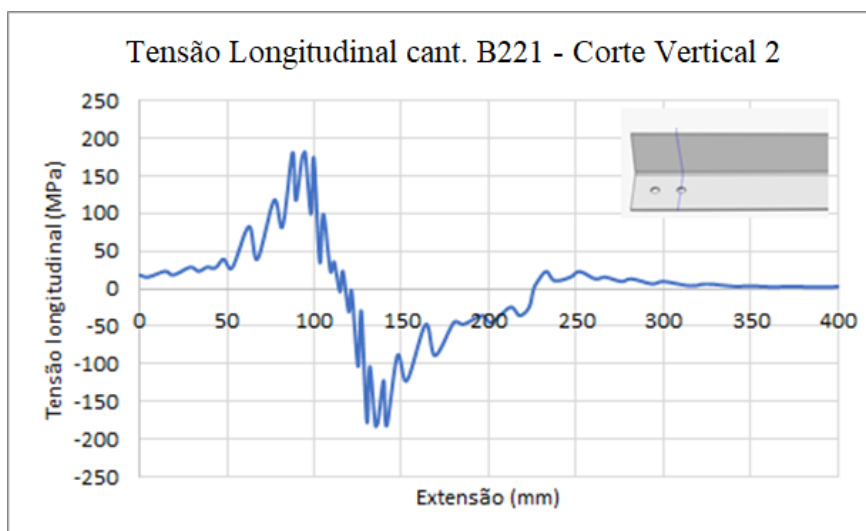


Figura 11 – Tensões no corte vertical 2 na cantoneira B221.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

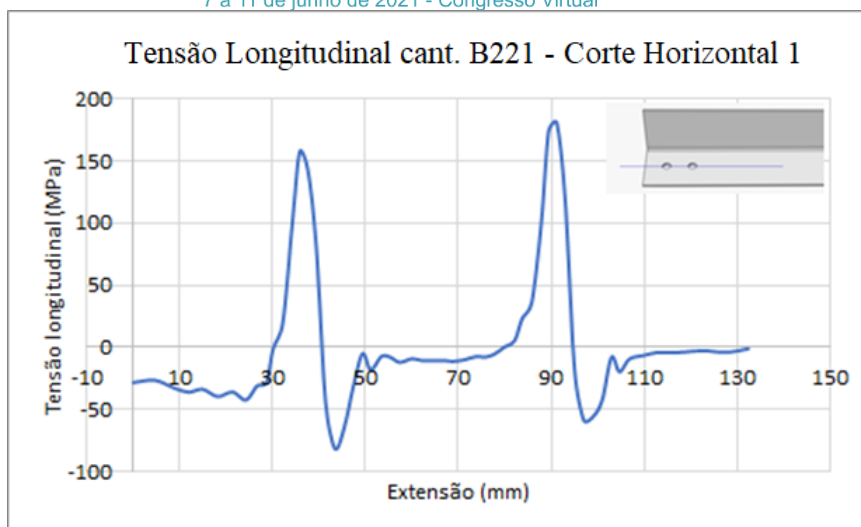


Figura 12 – Tensões no corte horizontal 1 na cantoneira B221.

Comparando o corte vertical 1 com o corte vertical 2 (cada um passando por um furo), notamos que a tensão é maior no furo mais interno, 157MPa, 173MPa, respectivamente, uma diferença de 10% a mais do primeiro furo em relação ao segundo furo.

Observa-se no corte horizontal 1 que as tensões aumentam no furo mais interno, sendo, respectivamente, 157MPa e 180 MPa, bem semelhante às tensões encontradas nos cortes verticais.

Para a cantoneira B222 modelada numericamente, analisando a tensão longitudinal (S12) no momento de deformação elástica, com carga aplicada de 20kN, temos a distribuição de tensões ao longo da cantoneira (Figura 13).

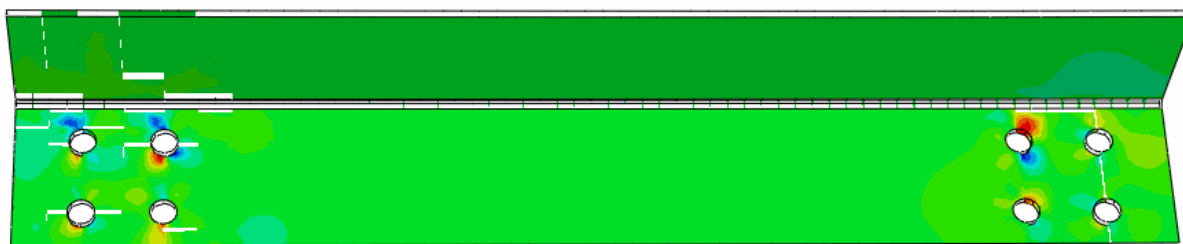


Figura 13 – Tensão longitudinal com 20kN aplicados na cantoneira B222.

De acordo com cada corte, foram elaborados os gráficos das tensões em cortes verticais (Figuras 14 e 15) e cortes horizontais (Figura 16 e 17) passando pelos furos.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

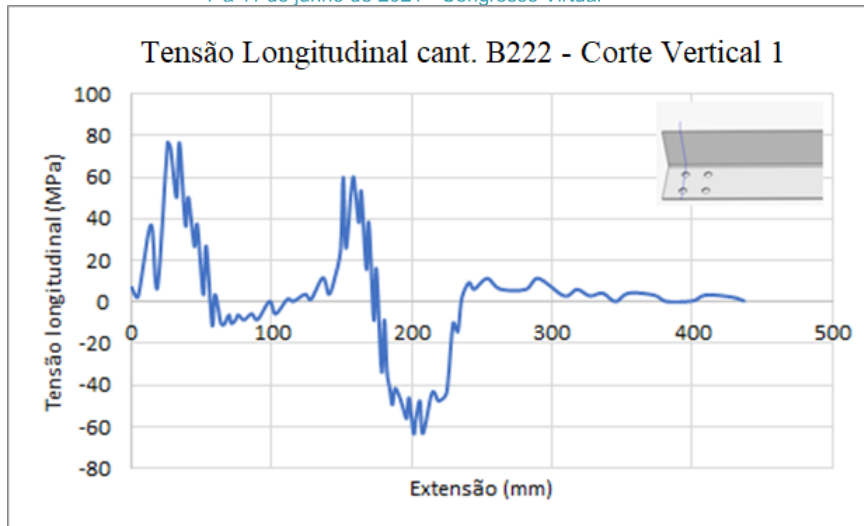


Figura 14 – Tensões no corte vertical 1 na cantoneira B222.

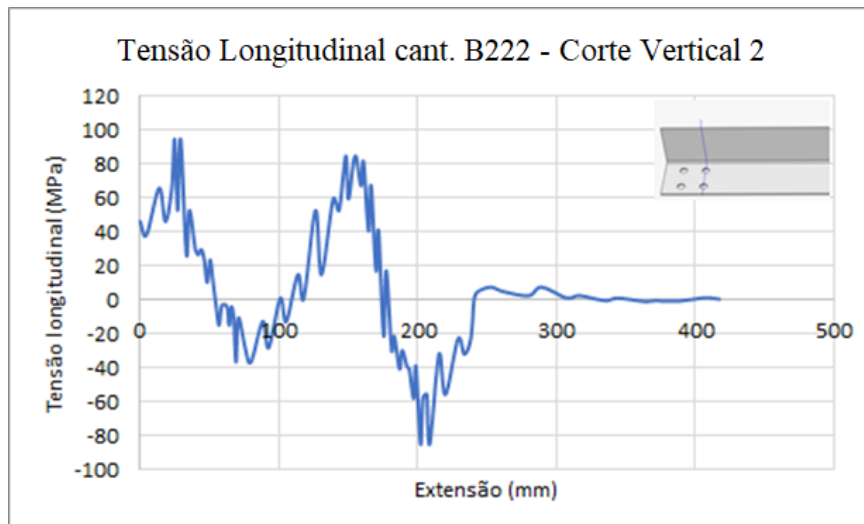


Figura 15 – Tensões no corte vertical 2 na cantoneira B222.

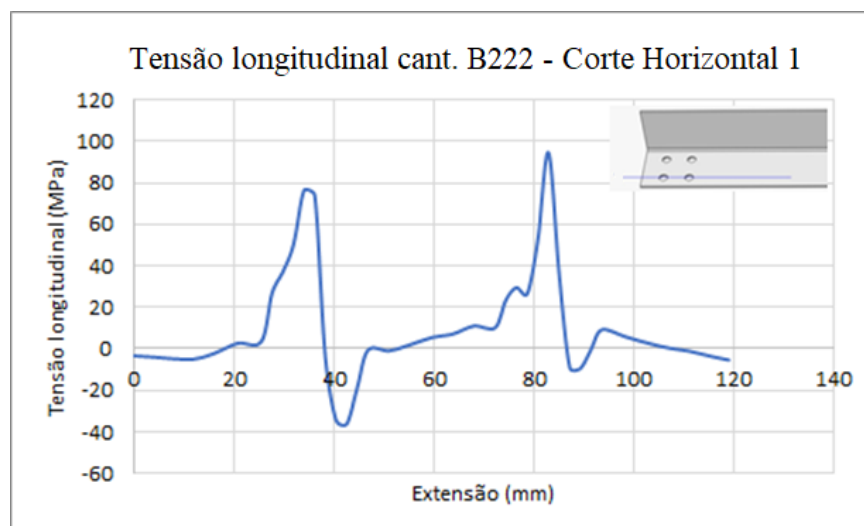


Figura 16 – Tensões no corte horizontal 1 na cantoneira B222.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

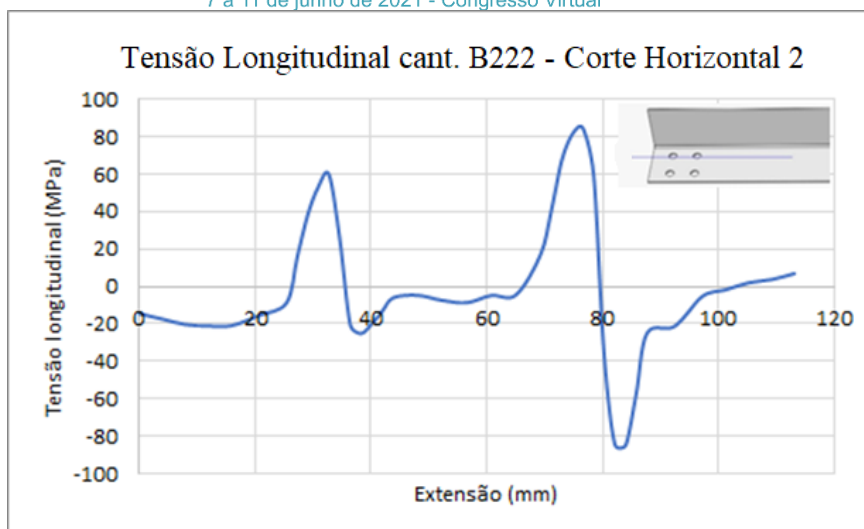


Figura 17 – Tensões no corte horizontal 2 na cantoneira B222.

Comparando o corte vertical 1 com o corte vertical 2 (cada um passando por dois furos), os resultados mostram que no corte 1 as tensões são 76MPa e 60MPa para os furos 1a e 1b, respectivamente. Já no corte 2, as tensões são 94MPa e 81MPa para os furos 2a e 2b, respectivamente, com tensão maior no furo mais interno da cantoneira e mais próximo da borda da cantoneira.

Podemos perceber no corte horizontal 1 que as tensões aumentam no furo mais interno, sendo, respectivamente, 73 MPa e 94 MPa, e no corte horizontal 2 as tensões são 60 MPa e 84 MPa, apresentando uma diferença quando comparados aos outros casos no furo mais interno e próximo da borda.

Conclusões

A boa concordância entre as curvas numéricas e experimentais no que diz respeito à carga aplicada vs. deslocamento mostram que a metodologia empregada neste estudo é capaz de simular o comportamento de cantoneiras parafusadas submetidas sob tração. Apesar das condições altamente não lineares da estrutura, a análise implícita do ABAQUS/Standard foi suficiente para gerar um modelo simplificado das cantoneiras e obter resultados satisfatórios. Ao longo deste estudo, foi possível obter as seguintes conclusões: os perfis ensaiados são bem representados pelos modelos numéricos, incorporando análises de grandes deformações e grandes deslocamentos, simulando adequadamente as tensões surgidas nas abas e nos furos das cantoneiras, que são valores compatíveis com o comportamento macro Carga vs. Deslocamento das cantoneiras analisadas. No caso com uma linha de parafusos, o orifício mais interno da cantoneira foi o primeiro a atingir a resistência última da peça. Já no caso com duas linhas de parafusos, o orifício mais interno da cantoneira e o mais próximo da borda livre foi o primeiro a atingir a resistência última da peça. Nota-se ainda que o furo que apresenta maior tensão longitudinal é sempre o mais interno da cantoneira e mais próximo da borda., isso ocorre, pois, a linha de furos mais próxima da extremidade livre apresenta menor rigidez e maior deformabilidade, absorvendo assim a maior tensão. Na deformação elástica, o aumento do número de parafusos aumenta a distribuição das tensões em cada furo, reduzindo a tensão máxima. Com o aumento da segunda linha de furos, a tensão máxima nos orifícios da cantoneira, como esperado, se reduz em 50%. Tanto no caso com dois furos e com quatro furos a análise de tensão mostrou as regiões da conexão mais sujeitas ao aumento ou gradiente de tensão, explicando em parte o colapso por seção líquida que se verifica em perfis formados a frio.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Referências

- ABAQUS, User's Manual, Version 6.14-4, Dessault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2014.
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. North American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington DC, 2001.
- AS/NZS: 4600 (2005), 'Cold-formed Steel Structures', Australia / New Zealand Standard, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT (2001). NBR 14.762 –Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio –Procedimento. Rio de Janeiro. 2001.
- BARBOSA, Wallison Carlos de Sousa. Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto. 2016. xxxi, 511 f., il. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- BS: 5950-Part 5 (1998), 'Structural Use of Steelwork in Building-Code of practice for design of cold-formed thin gauge sections', British Standards Institution, 1998.
- FASOULAKIS, Z. C.; RAFTOYIANNIS, I. G. E AVRAAM, T. P. Experimental and numerical study on single-bolted cold-formed angles under tension and compression. *Frontiers in Built Environment*, Vol. 3(75), National Technical University of Athens, Greece, 2017.
- HANCOCK, G. J. Cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 473-487, University of Sydney, Australia, 2003.
- MAKESH, A. P. E ARIVALAGAN, S. Experimental and analytical study on behaviour of cold formed steel using angle section under tension members. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 5(1), 20-28. India, 2018.
- NAS (2001). Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members, North American Specification, Washington, D.C. Google Scholar, 2001.
- PAULA, V. F. de. Análise Experimental e Numérica de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio, sob Tração e Conectadas por Parafusos. Publicação n.º E.TD 005A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p, 2006.
- SALMON, C. G., JOHNSON, J. E. *Steel Structures, Design and Behavior*. Five Edition. New York, Harper Collins College Publishers, 2009.
- YU, W. W. *Cold-formed Steel Design*, In New York, John Wiley e Sons, 3rd Ed, 2000.