



ANÁLISE NUMÉRICA DE CANTONEIRAS DE AÇO FORMADAS A FRIO, SOB TRAÇÃO E CONECTADAS POR PARAFUSOS

Ronivon Soares Pereira

Valdeir Francisco de Paula

Luciano Mendes Bezerra

Jerfson Moura Lima

ronivon.sp@gmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

valdeir.paula@ifg.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG

Campus Goiânia – Departamento de áreas acadêmicas nº 3, 75.055-110 Goiás, Goiânia, Brasil

lmbz@unb.br

jerfsonlima2009@hotmail.com

Universidade de Brasília - UNB

Campus Darcy Ribeiro SG-12, 70.910-900, Distrito Federal, Brasília, Brasil

Resumo. Quando cantoneiras de aço, conectadas por parafusos, são submetidas a esforço de tração, as mesmas não se deformam uniformemente. O fator responsável pela redução da seção líquida da conexão é o fenômeno conhecido como shear lag, o qual reduz a capacidade resistente da conexão nas cantoneiras. No cálculo da resistência última de uma peça tracionada, o fator C_t (coeficiente de redução da seção líquida) é o responsável em considerar esse fenômeno. Com o intuito de verificar o comportamento de cantoneiras formadas a frio com conexões parafusadas, submetidas a tração, foram modeladas diversas cantoneiras com a ajuda do pacote comercial de análise por elementos finitos ANSYS. 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.

Palavras-chave: Cantoneiras, Coeficiente de redução da seção líquida, ANSYS, Modelagem numérica

INTRODUÇÃO

Quando se depara com estruturas metálicas, o uso do aço tem sido bastante estimulado nos últimos anos se tratando da construção civil brasileira, especialmente devido aos inúmeros benefícios que as estruturas metálicas oferecem em condições adversas, tais como canteiro de obras reduzido, curto prazo para a execução da obra, projetos arquitetônicos arrojados, existência de grandes vãos e exigência de alto nível de qualidade e precisão. Juntamente com os processos de fabricação e montagem, esses benefícios tornam as estruturas metálicas, principalmente os perfis formados a frio, uma grande alternativa para o salto de desenvolvimento que a indústria da construção necessita realizar em todo o país.

Os perfis formados a frio são obtidos a partir da dobra de chapas planas de diversas espessuras, frequentemente com valores de até 6,35 mm, segundo (Yu, 2000), executada em fábricas por perfiladeiras ou dobradeiras e têm uma extensa aplicação no setor da construção civil, tendo grande versatilidade e, normalmente, são destinados a obras cujas magnitudes dos carregamentos estejam entre baixas e médias. Tendo em vista, o processo industrializado do aço, estes perfis têm a vantagem de oferecer baixo peso próprio e a facilidade de serem produzidos, economicamente, com seções transversais pouco usuais.

O bom funcionamento das estruturas através do elevado grau de tecnologia foi desenvolvido e aplicado para um fim comum, levando em consideração os estados limites normativos, que é assegurar e proteger a vida daqueles que dependem, de alguma forma, do bom desempenho e funcionamento das estruturas.

Para elementos tracionados de aço formado a frio o desempenho de tais elementos estruturais se difere de várias maneiras daqueles de aços pesados. Para se desenvolver um bom projeto de estruturas de aço formado a frio, as especificações são altamente desejáveis, e a norma, (AISI, 2016) e a NBR 14.762 (ABNT, 2010) no Brasil são exemplos de normas de construção correspondentes às estruturas de aços formados a frio.

Sendo assim, abordagens referentes ao comportamento das ligações parafusadas em perfis formados a frio tem que ser levado em consideração. Segundo (Taylor, 2000), alguns fenômenos que influenciam os resultados das resistências dessas conexões ainda não estão completamente conhecidos e equacionados. Um desses fenômenos refere-se ao efeito *shear lag*, que ocorre quando um perfil não é conectado através de todos os elementos componentes da seção transversal. Nesses casos, ocorre uma redução na resistência à tração da peça quando ela é determinada pela ruptura da seção líquida.

As pesquisas referentes ao fenômeno *shear lag* em perfis L (comumente denominados no Brasil de “cantoneiras”) formados a frio, que direcionaram a definição das equações utilizadas para a sua consideração numa das mais utilizadas normas técnicas – a norma americana para perfis formados a frio (AISI, 1999), foram realizadas já na década de 1990 por (LaBoube e Yu, 1995), abrangendo a ruptura de 27 cantoneiras. Atualmente (Teh e Gilbert, 2013) realizaram 61 e (Teh e Gilbert, 2014) realizaram 8 ensaios em cantoneiras onde contribuíram para a atualização da equação na tabela J6.2-1 da (AISI, 2016) relacionada ao fenômeno *shear lag* (coeficiente de redução da seção líquida).

Este artigo busca analisar, o comportamento estrutural de ligações parafusadas em cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à tração, visando à obtenção de dados oferecidos através de ensaios experimentais, onde fornecem informações fundamentais para a calibração de modelos numéricos de elementos finitos, pois levam em consideração as

situações reais de execução das estruturas e as características especificadas dos materiais utilizados no país.

Evidentemente, as informações experimentais são fundamentais para a calibração desses métodos e modelos numéricos e não se pode prescindir delas, sob risco de serem obtidas soluções sem respaldo da realidade. Bem empregado e dentro de certos limites, entretanto, o método dos elementos finitos possibilita o aumento do conhecimento da resposta estrutural, possibilitando identificar regiões com alta concentração de tensões e prever o desenvolvimento das deformações na estrutura.

Neste contexto, o método de elementos finitos foi utilizado como ferramenta de modelagem de cantoneiras formadas a frio com conexões parafusadas submetidas à tração, e as respostas das reações e deslocamentos obtidas e verificadas com os valores experimentais.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos pesquisadores têm buscado, através de trabalhos experimentais e/ou numéricos, uma relação matemática que quantifiquem a perda de eficiência da seção de um perfil com conexão parafusada em razão do efeito *shear lag*.

(Yip e Cheng, 2000) analisaram o efeito *shear lag* em perfis U e cantoneiras de abas iguais formadas a frio com conexões parafusadas. Um modelo de elementos finitos com a consideração das não linearidades física e geométrica (grandes deformações) empregando o programa ABAQUS foi utilizado para modelar e analisar os ensaios, possibilitando também a investigação dos fatores que afetam a eficiência da seção líquida dos perfis ensaiados.

(Chung e Ip, 2001) apresentaram uma investigação do comportamento de conexões parafusadas em aços formados a frio, especialmente enfatizando a modelagem de três modos de rupturas: esmagamento da chapa, corte do parafuso e ruptura da seção líquida. Os autores realizaram um estudo paramétrico envolvendo diferentes configurações das ligações parafusadas de modo a fornecer valores de resistências ao amassamento para fins de projeto, comparando os resultados as prescrições de quatro normas técnicas, cujas equações, segundo os autores, não se aplicam a aços de alta resistência, devido a sua reduzida ductilidade. Os autores utilizaram, tal como no trabalho anterior de (Chung e Ip, 2000), o programa ANSYS e os mesmos tipos de elementos para modelar o problema, chegando à solução com o método de Newton-Raphson (*full*), pois o modelo empregado considera também a não linearidade material, geométrica e de contato. A Fig. 1 mostra um modelo de elementos finitos típico, relativo a metade do espécime ensaiado (simétrico em relação ao seu eixo longitudinal), que possui cerca de 2000 nós, 1200 elementos sólidos (SOLID45) e 1000 elementos de contato (CONTAC49).

Após comparação com resultados numéricos de elementos finitos, os autores propuseram uma equação que relaciona a resistência ao esmagamento com as resistências de escoamento e ruptura do material através de um coeficiente de resistência, permitindo sua aplicação a conexões parafusadas de aços com baixa ou com alta resistência e com diferentes valores de ductilidade. Ao final, eles concluíram que o método dos elementos finitos consegue prever corretamente os três modos de falhas típicos em conexões parafusadas de aços formados a frio: esmagamento, rasgamento e ruptura da seção líquida.

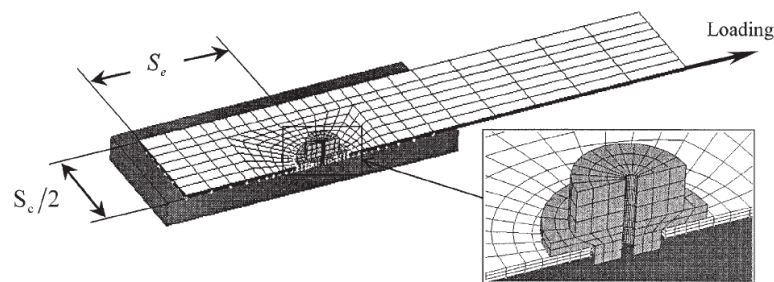


Figura 1. Modelo de elementos finitos da conexão parafusada empregado por (Chung e Ip, 2001)

(Maiola, 2004) realizou ensaios experimentais abrangendo ligações parafusadas em chapas finas e perfis U e L formados a frio, perfazendo um total 116 corpos-de-prova de chapas e 82 de perfis, de modo a estudar o fenômeno do *shear lag* e investigar as prescrições da NBR 14.762 (ABNT, 2010) relativas a este tema.

O autor também realizou uma modelagem numérica para comparação com os resultados experimentais obtidos através do programa ANSYS, considerando a não linearidade geométrica através de uma formulação lagrangeana atualizada e empregando o processo incremental-iterativo de Newton-Raphson. As malhas foram geradas automaticamente pelo programa e o elemento utilizado nas modelagens foi o de casca de 4 nós (SHELL43 – *Plastic Large Strain Shell*). Na Fig. 2 é apresentada uma comparação entre os diagramas carga deslocamento numérico e experimental, enquanto na Fig. 3 são apresentadas as curvas de isotensões e a deformada relativas ao ensaio de ruptura da seção líquida de uma cantoneira.

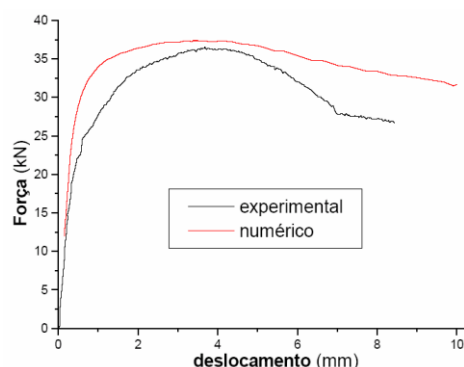


Figura 2. Diagramas força-deslocamento numérico e experimental para modelo de cantoneira (Maiola, 2004)

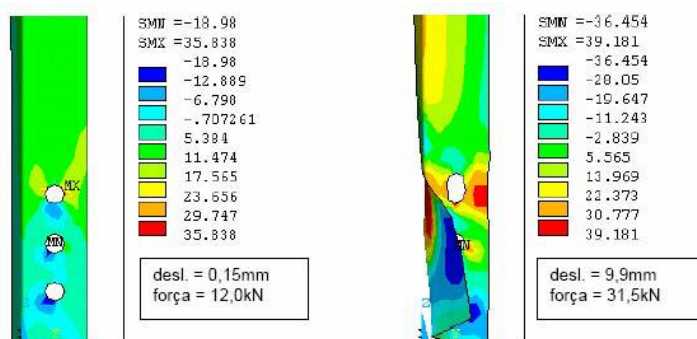
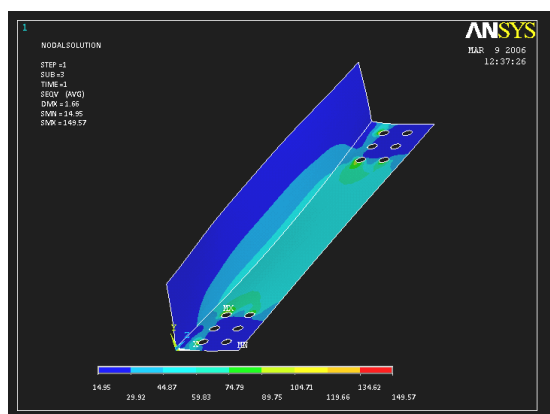
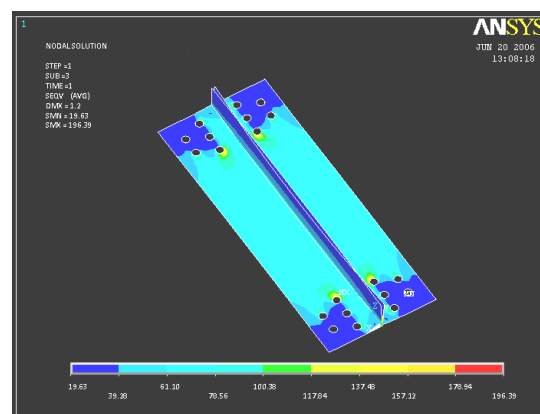


Figura 3. Curvas de isotensões e deformada para modelo de cantoneira (Maiola, 2004)

(PadmaPriya e Kandasamy, 2010) realizaram ensaios experimentais em cantoneiras de abas iguais e cantoneiras duplas conectadas. Através dos resultados de dados experimentais os autores puderam fazer a investigação numérica utilizando o programa ANSYS e relatando o comportamento carga x deslocamento e modos de falhas. A carga atingida pelos modelos ensaiados foi comparada com a capacidade de carga teórica prevista pelas normas internacionais e com a capacidade de carga prevista pela investigação numérica. A Fig. 4 apresentam resultados relatados pelo programa ANSYS em cantoneiras de abas iguais 80×80 (mm²) com 3 mm de espessura e duplas cantoneiras de 100×50 (mm²) com 4 mm de espessura.



(a) Cantoneiras de abas iguais 80×80 (mm²)



(b) Duplas cantoneiras 100×50 (mm²) ligadas ao mesmo lado da placa de reforço

Figura 4. Distribuição das tensões (PadmaPriya e Kandasamy, 2010)

(PadmaPriya, 2015) realizou uma pesquisa experimental e numérica em cantoneiras de abas iguais e duplas cantoneiras com espessuras de 2 e 3 mm. O autor desenvolveu a investigação numérica no programa ANSYS, e utilizou o elemento SHELL 63 para realizar os modelos numéricos. Nos modelos de elementos finitos, a deformação de cisalhamento dos parafusos foi ignorada, julgando que a carga se transferia da placa de ligação através dos parafusos para as cantoneiras. Desta forma, o autor concluiu que as tensões de contorno obtidas através da análise de elementos finitos indicam que ocorrem tensões máximas nos orifícios mais internos dos parafusos a partir dos quais as falhas experimentais foram iniciadas. A distribuição das tensões obtida na investigação numérica relata uma boa concordância com os resultados experimentais.

2 MODELAGEM NUMÉRICA

Para a modelagem numérica das cantoneiras formadas a frio com conexões parafusadas submetidas à tração, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), através do *software* ANSYS (ANSYS, 1997). Como referências para a modelagem, foram usados resultados experimentais de 13 cantoneiras com espessura nominal igual a 2,25 mm e com propriedades mecânicas dos materiais utilizados comercialmente conhecido por COR 420 (f_y nominal de 300 MPa e f_u nominal de 420 MPa).

Como afirmado por (Bakker e Pekoz, 2003), a acurácia dos resultados do método dos elementos finitos está condicionada aos seguintes aspectos: Tipo dos elementos; Consideração

da não linearidade geométrica e física; Técnica utilizada na solução numérica; Condições de contorno e Discretização dos elementos.

A seguir apresentam-se todas as considerações adotadas na modelagem numérica, evidenciando os aspectos influenciadores na precisão dos resultados, como descrito no parágrafo anterior.

2.1 Tipo dos Elementos

A escolha do tipo de elemento finito consistiu inicialmente na avaliação de dois modelos, um com elemento sólido e outro com elemento de casca, ambos pertencentes a biblioteca do ANSYS (ANSYS, 1997). O elemento sólido utilizado foi o SOLID45. Ele é um elemento 3D com 8 nós e 3 graus de liberdade em cada nó, com capacidade de suportar análises envolvendo a plasticidade grandes deformações. O SHELL43 foi o elemento de casca utilizado, possuindo 4 nós e 6 graus de liberdade por nó, também suportando considerações de plasticidade, grandes deformações e grandes deslocamentos.

Ambos os modelos apresentaram tempos de processamento semelhantes. No entanto, ao comparar os resultados obtidos com os experimentais, observou-se que o modelo com elemento sólido apresentou comportamento rígido. Outra desvantagem constatada do elemento sólido em comparação com o elemento de casca, é que o mesmo exige que, ao variar a espessura de um perfil, uma nova configuração de malha seja gerada.

Por esses motivos, optou-se por empregar na modelagem numérica das cantoneiras o elemento de casca SHELL43. Na Fig. 5 está apresentado o modelo da cantoneira empregando elementos de casca, com detalhe da região da conexão, onde realizou-se uma maior discretização da malha.

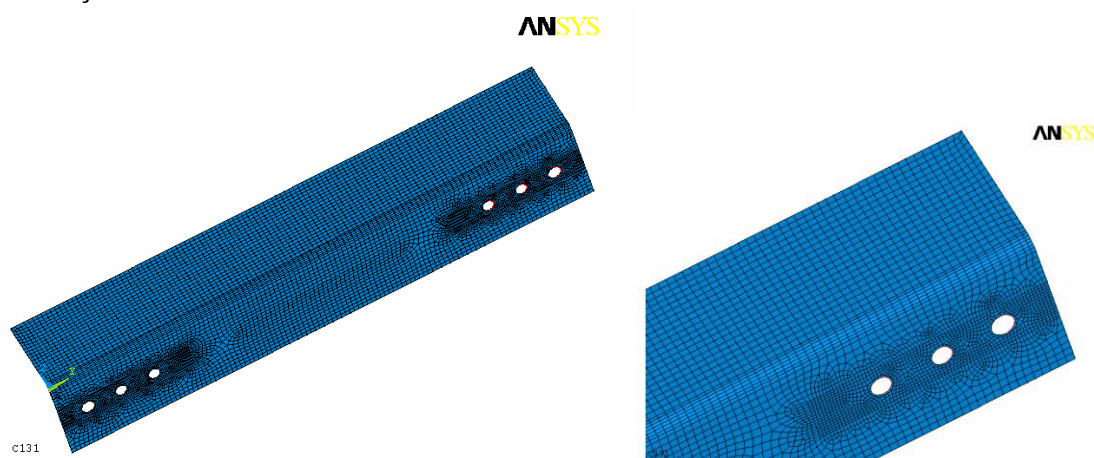


Figura 5. Modelagem da cantoneira com 3 furos em apenas um alinhamento

2.2 Não linearidade geométrica e física

Com a análise dos resultados experimentais de 13 cantoneiras, observou-se que ao final dos ensaios, as cantoneiras haviam sofrido grandes deformações. Com isso, para que o modelo numérico com curvas bilineares, forneça resultados representativos, as não linearidades devem ser consideradas. O elemento de casca escolhido (SHELL43) considera os efeitos das não linearidades, entram no processamento através da ativação da opção NLGEOM do *software* ANSYS (ANSYS, 1997).

Segundo Ramberg-Osgood (1943), a curva tensão x deformação real, que possui um relacionamento não linear, pode ser descrita pela equação 1, que é especialmente útil para metais, a qual foi criada para descrever o comportamento não linear entre tensão e deformação próximo do escoamento, devido ao efeito de *strain-hardening* existente neste tipo de material. A equação de Ramberg-Osgood pode ser escrita da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

onde σ_0 é a tensão de escoamento e E é o módulo de deformação elástica. As constantes α e n são obtidas da curva de tensão x deformação de engenharia.

2.3 Técnicas utilizadas na solução numérica

O procedimento interno de solução utilizado foi o *Sparse Direct Solver*, caracterizado por obter a solução a partir de múltiplos passos de carga (normalmente em até 50 passos). Este procedimento de eliminação direta é indicado para análises não lineares, sendo capaz de chegar a soluções com grande velocidade, caso a máquina utilizada possua memória disponível.

Durante o processamento dos modelos também foi utilizado o método de *Full Newton-Raphson*, método esse que altera a matriz de rigidez a cada iteração de equilíbrio. O ANSYS (ANSYS, 1997) utiliza a matriz de rigidez tangente, no entanto, se uma tendência de divergência é detectada, o programa então descarta a interação divergente e reinicia a solução a partir de uma combinação ponderada das matrizes tangentes e secantes. Quando as interações voltam a convergir, o *software* passa novamente a utilizar a matriz de rigidez tangente.

2.4 Condições de contorno

Os perfis foram modelados integralmente, ou seja, em sua completa extensão (600 mm de comprimento). Em uma extremidade, foram restritos todos os graus de liberdade dos nós dos furos, e aqueles imediatamente próximos a eles. A restrição se deu nas rotações e no deslocamento perpendicular ao plano da aba da cantoneira. A Fig. 6 mostra um detalhe de acoplamento em uma cantoneira com 3 furos em apenas uma linha de parafusos.

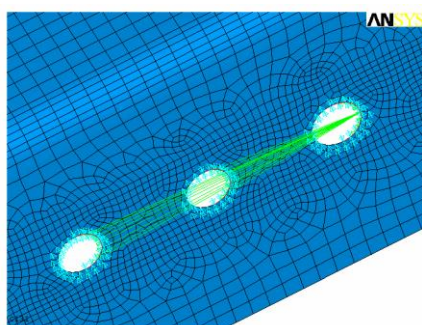


Figura 6. Detalhe do acoplamento de nós na região de contato com os parafusos

Na outra extremidade, local de representação da parte móvel da máquina de ensaio, realizaram-se as mesmas restrições nos nós dos furos e aqueles próximos a eles. No entanto, nos nós em contato direto com os parafusos, aplicou-se uma carga, de modo a garantir a direção de aplicação da carga como realizado no ensaio.

O acoplamento, na direção longitudinal da cantoneira, dos nós em contato com os parafusos foi realizado. Esse processo foi necessário, visto que a chapa de fixação impedia os deslocamentos relativos entre os parafusos.

2.5 Discretização dos elementos

A geração das malhas dos modelos processados foi executada de maneira automática pelo programa. Entretanto, foram estabelecidos critérios de dimensões e número de elementos.

Foi especificado que cada furo fosse representado por 24 elementos e que a área retangular, criada em torno dos furos para permitir um maior refinamento naquela região, tivesse elementos com arestas de até 2,5 mm. Para as demais áreas, foram especificadas arestas de 5,0 mm.

Este processo de discretização dos perfis foi bem apropriado, produzindo malhas com contornos e distribuição adequadas aos problemas analisados.

3 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

A modelagem numérica foi realizada em 13 perfis conforme os critérios apresentados anteriormente. Em todos eles, foram utilizadas as mesmas características geométricas dos materiais empregadas nos perfis ensaiados na prensa.

A condição de colapso dos modelos foi identificada da seguinte maneira:

- ✓ Na ocorrência de não convergência dos resultados e, mesmo com a redução dos passos de carga, a solução não convergia;
- ✓ Com ocorrência de alteração excessiva da espessura de um elemento da malha do modelo, próximo à região dos furos.

3.1 Cantoneiras de abas iguais

Foram modeladas 5 cantoneiras de abas iguais, com uma linha de parafusos, com variação entre elas no número de seções de parafusos. Essas cantoneiras possuem abas de 100 mm de largura, espessura nominal de 2,25 mm e comprimento longitudinal de 600 mm. Os modelos foram processados com as espessuras médias reais dos perfis medidas com paquímetro. As características das cantoneiras de abas iguais são apresentadas na Tabela 1 e os resultados individuais das cantoneiras modeladas são apresentados a seguir:

Tabela 1. Características das cantoneiras de abas iguais

Perfil	Aba conectada bc (mm)	Aba desconectada bd (mm)	Espessura real t (mm)	Comprimento real Lt (mm)	Nº de Seções de Furos	Nº de Furos por Seção	Total de furos no Perfil
C111	100	100	2,41	542	1	1	1
C121	100	100	2,42	542	2	1	2
C131	100	100	2,25	542	3	1	3
C141	100	100	2,56	598	4	1	4

3.1.1 Cantoneira C141

A Figura 7 mostra a deformada da cantoneira C141, obtida na modelagem numérica, enquanto na Fig. 8 apresenta-se a fotografia da deformada real do perfil, onde nota-se compatibilidade das deformações obtidas no modelo e aquelas desenvolvidas no perfil ensaiado.

Na Figura 9 são apresentados os deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira (eixo Y), para o elemento numérico, cujo valor máximo foi 11,07 mm, enquanto no ensaio experimental a mesma cantoneira atingiu 26 mm na carga máxima. As curvas carga x deslocamento obtidas no ensaio e a partir do modelo são apresentadas na Fig.10.

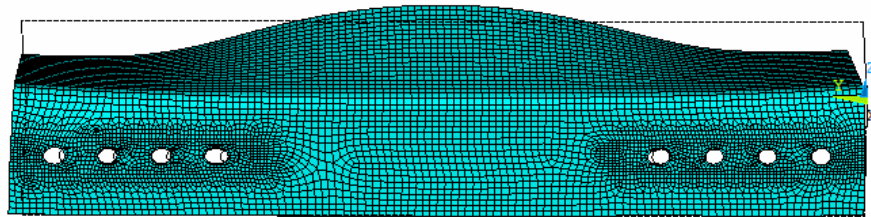


Figura 7. Deformada da cantoneira C141



Figura 8. Deformada da cantoneira C141 ensaiada

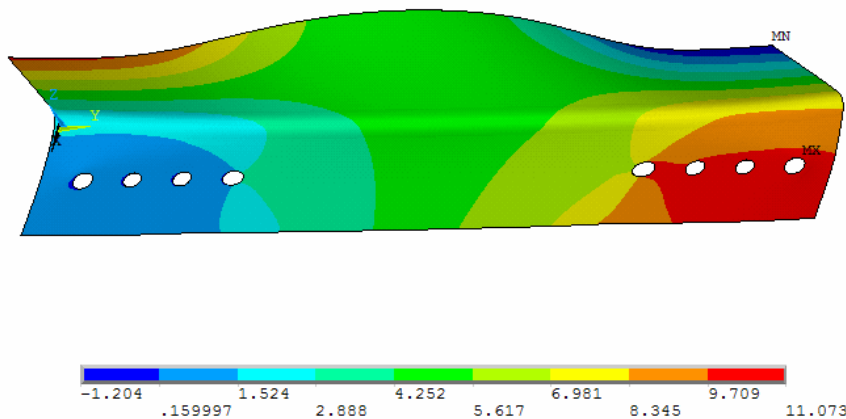


Figura 9. Deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira C141

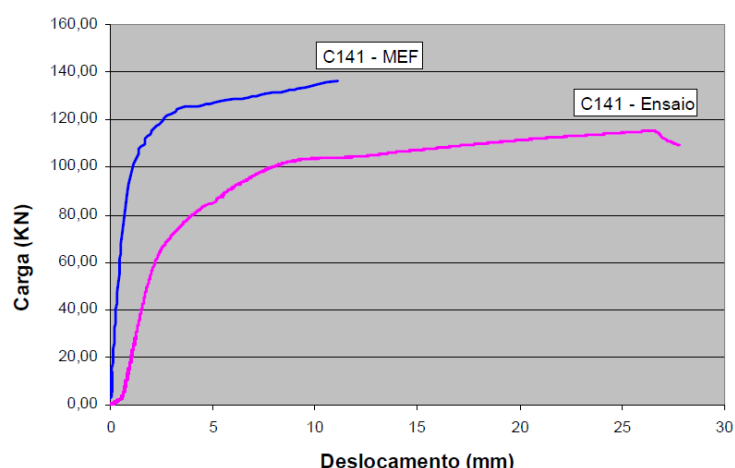


Figura 10. Deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira C141

Analisando o gráfico da Fig. 10 compreende-se que o modelo numérico apresentou maior rigidez do que aquele obtido experimentalmente. Isso pode ser devido, principalmente, à acomodação inicial dos perfis aos parafusos durante os ensaios e à sensibilidade do transdutor de deslocamento a outras deformações além da deformação estritamente longitudinal (ao longo do eixo Y). Outra causa dessa diferença pode ser devida à excentricidade das chapas de fixação em relação à aba conectada, pois elas transmitem uma carga excêntrica aos furos, o que acaba gerando um momento nas abas da cantoneira.

De qualquer maneira, é de se esperar que o modelo numérico por elementos finitos conduza a menores deslocamentos, uma vez que os deslocamentos dos ensaios incorporam os deslocamentos ocorridos após a ruptura da seção líquida (abertura da seção no parafuso) ou enrugamento da parede do furo, no caso de ocorrência do esmagamento.

A consideração desses fenômenos em um modelo numérico não conduz a resultados mais precisos do ponto de vista de carregamentos e produzem dificuldades maiores na modelagem dos perfis como, por exemplo, a inclusão de elementos de contato ou a ativação e desativação de elementos da malha. Na Fig.11 são apresentadas as imagens das tensões de *von Mises* ao longo da cantoneira e as deformações ocorridas na região dos furos, onde desenvolveram-se as maiores tensões de tração.

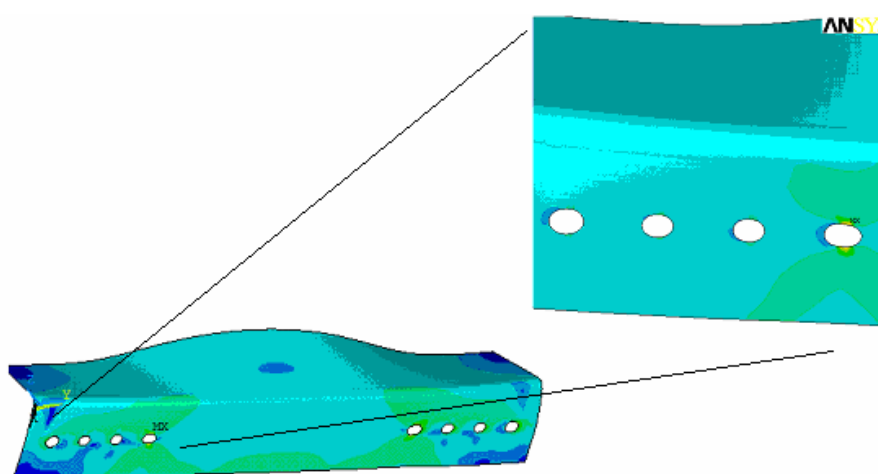


Figura 11. Tensões de *von Mises* e deformações longitudinais nos furos da cantoneira C141

A carga de colapso obtida no modelo foi de 136,07 kN, enquanto no ensaio chegou a 115,23 kN, com uma diferença de cerca de 18%. Assim confirma-se que as deformações desenvolvidas no modelo são compatíveis, em posição e forma, àsquelas encontradas nos ensaios.

3.1.2 Cantoneira C131

As tensões de *von Mises* e as tensões longitudinais próximas ao furo onde ocorrem as tensão de tração máxima na cantoneira C131 são apresentadas na Fig. 12.

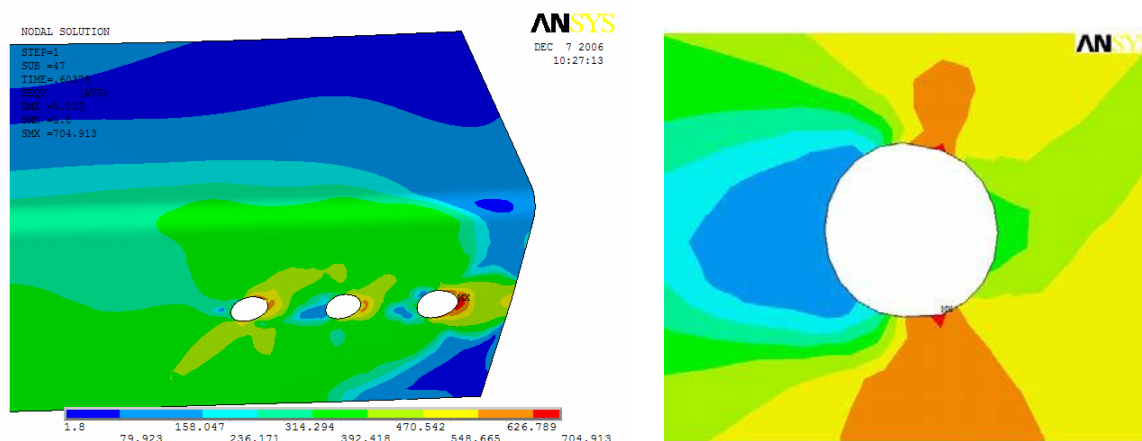


Figura 12. Tensões de *von Mises* próximas aos furos da cantoneira C131 e tensões longitudinais no furo com tensão de tração máxima

Nas Figuras anteriores observa-se uma alta concentração de tensões nas bordas dos furos e, no detalhe, fica evidente a alta tensão de tração no local onde ocorreu a ruptura da seção líquida no perfil ensaiado. A carga de colapso deste modelo foi de 95,63 kN, enquanto no ensaio foi obtida carga de 110,31 kN, correspondendo a uma diferença de -13%.

É importante salientar que qualquer pequena alteração na espessura indicada no modelo corresponderá a uma alteração direta da carga de colapso. Neste caso, o mesmo modelo foi reprocessado, informando a espessura do elemento como 2,475 mm (10% superior à medida de ensaio, que foi 2,25 mm). A carga de colapso do modelo, nesta situação, passou então para 106,13 kN (menor cerca de 4% em relação à carga de ensaio). Como a espessura medida no perfil é média, é possível que a espessura real na região próxima aos furos não seja exatamente igual a ela, contribuindo para essa diferença.

3.1.3 Cantoneira C121

À medida que o número de seções de parafusos reduz, aumentam as tensões concentradas nos furos, levando também a um aumento de suas deformações. As tensões de *von Mises* nas extremidades dos dois modelos são apresentadas na Fig. 13.

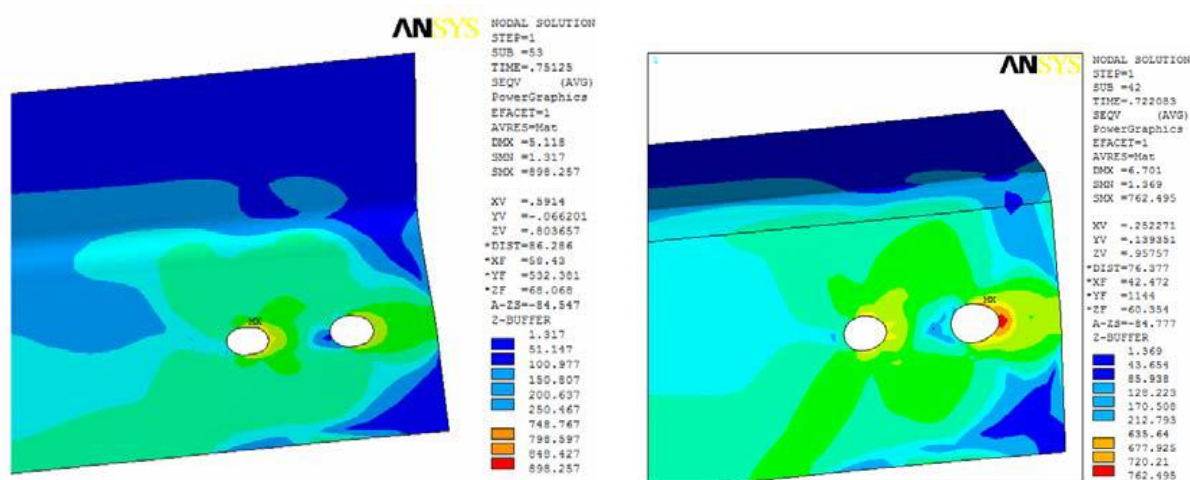


Figura 13. Tensões de *von Mises* próximas aos furos da cantoneira C121, com 600 mm (à esquerda) e com 1200 mm de comprimento (à direita)

Nas figuras anteriores, pode-se observar, pequenas mudanças no caminho das tensões, o que não afetou de forma considerável a carga de colapso do modelo, tendo o perfil de 600 mm chegado a uma carga de 80,83 kN e o perfil de 1200 mm chegado a uma carga de 77,67 kN. De qualquer forma, esses valores estão bastante próximos daquele obtido experimentalmente (77,85 kN). Isso leva a uma diferença menor do que 4%.

3.1.4 Cantoneira C111

A Figura 14 mostra as tensões de *von Mises* no colapso da cantoneira C111, com apenas 1 parafuso. Observa-se uma mudança gradual na distribuição das tensões (e das deformações) entre esta cantoneira e as demais cantoneiras da mesma série, as quais possuem um número maior de parafusos. Isso provoca um aumento nas deformações dos furos e uma redução das tensões de compressão (e nas deformações) sobre a aba desconectada. Isto pode ser visto na Fig. 15.

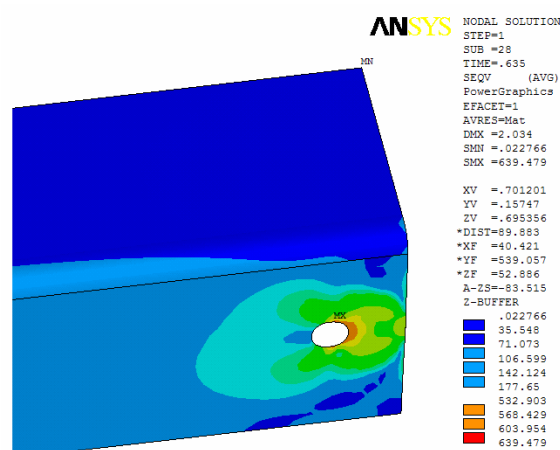


Figura 14. Tensões de *von Mises* próximas aos furos da cantoneira C111

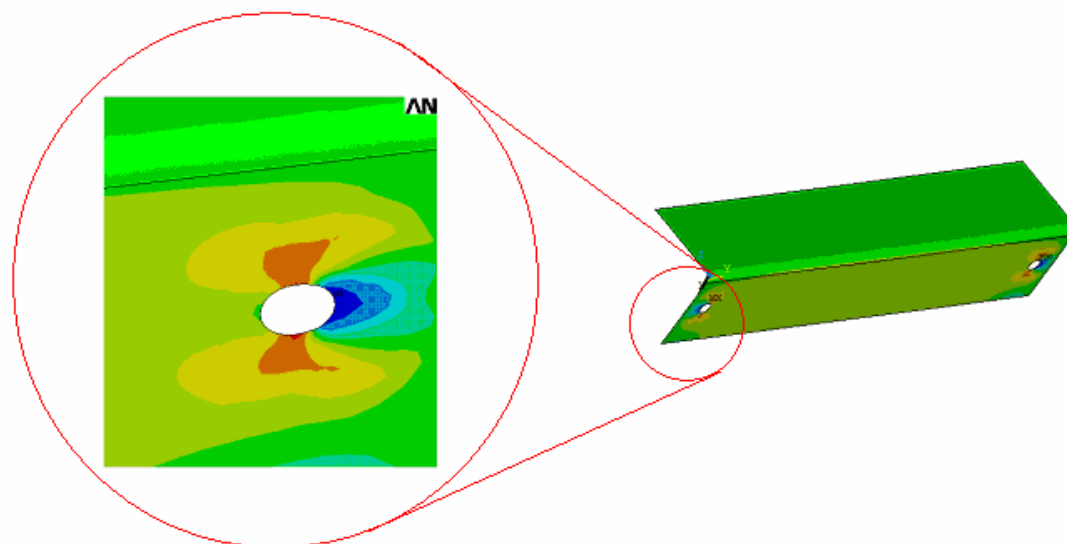


Figura 15. Distribuição das tensões longitudinais nos furos e ao longo da cantoneira C111

A carga de colapso do modelo foi de 36,07 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 44,13 kN, ou seja, ficando a carga do modelo cerca de 18% abaixo da carga do ensaio. O deslocamento máximo ocorrido no modelo foi de 2,03 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 13 mm.

De maneira geral, as características observadas nos resultados das cantoneiras de abas iguais aplicam-se também àqueles resultados das demais cantoneiras modeladas. Assim, são apresentadas a seguir breves considerações sobre cantoneiras de abas desiguais e aquelas com duas linhas de parafusos.

3.2 Cantoneiras de abas desiguais conectadas pela aba maior

Comparando com as cantoneiras de abas iguais em relação aos ensaios experimentais, as cantoneiras de abas desiguais mostraram desempenho diferenciado especialmente quanto à carga de ruptura. Assim, de modo a avaliar a capacidade dos modelos capturares, essas diferenças foram modeladas e processadas quatro desses perfis, com abas conectadas de 100 mm e abas desconectadas de 50 mm, todas com espessura nominal de 2,25 mm e comprimento total de 600 mm. A Tabela 2 apresenta as características das cantoneiras de abas desiguais.

Tabela 2. Características das cantoneiras de abas desiguais

Perfil	Aba conectada bc (mm)	Aba desconectada bd (mm)	Espessura real t (mm)	Comprimento real Lt (mm)	Nº de Seções de Furos	Nº de Furos por Seção	Total de furos no Perfil
E111-L	100	50	2,33	598	1	1	1
E121-L	100	50	2,27	598	2	1	2
E131-L	100	50	2,25	598	3	1	3
E141-L	100	50	2,29	598	4	1	4

3.2.1 Cantoneira E141-L

A carga de ruptura obtida no ensaio desta cantoneira foi de 102,71 kN, enquanto no modelo foi obtida 116,54 kN, portanto cerca de 13% superior. Na Fig. 16 aparece a distribuição de deslocamentos no modelo do perfil E141-L, cujo deslocamento máximo na direção longitudinal foi de 11,14 mm, enquanto no ensaio este valor foi de cerca de 29 mm.

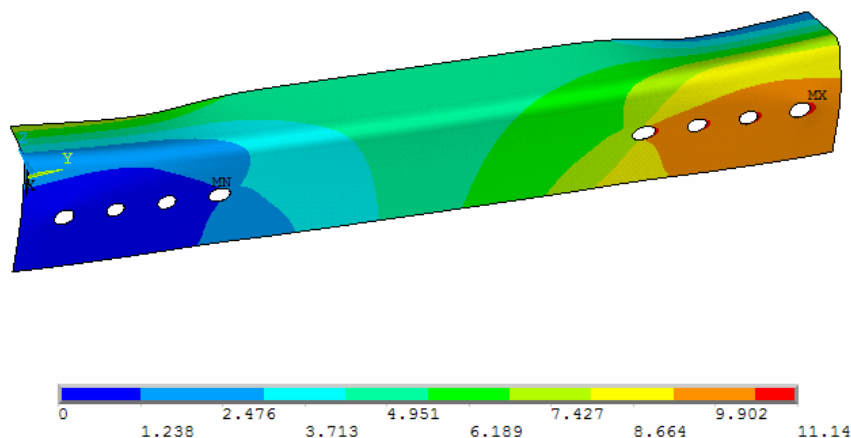


Figura 16. Distribuição de deslocamentos ao longo da cantoneira E141-L

3.2.2 Cantoneira E131-L

Este modelo apresentou ótimo desempenho quanto à carga de ruptura em torno de 87,19 kN. Quando comparado com o resultado do ensaio, que atingiu 89,63 kN, a carga de ruptura do primeiro ficou apenas 2,7% menor do que este. A Fig. 17 apresenta detalhes da malha gerada automaticamente para a cantoneira E131-L.

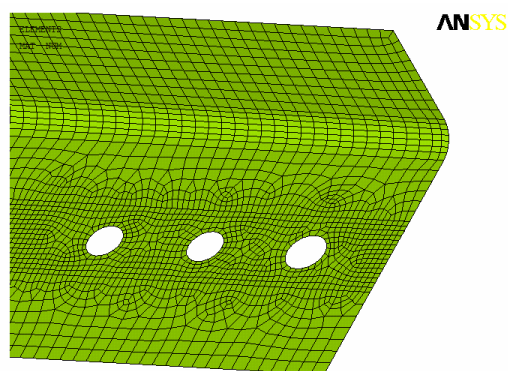


Figura 17. Malha na região dos furos da cantoneira E131-L

3.2.3 Cantoneira E121-L

Nesta cantoneira, a carga de colapso dada pelo modelo numérico foi de 71,91 kN, enquanto o resultado do ensaio forneceu 72,80 kN, levando a uma carga do modelo apenas 1,2% menor. A Fig. 18 mostra as tensões próximas aos furos da cantoneira E121-L.

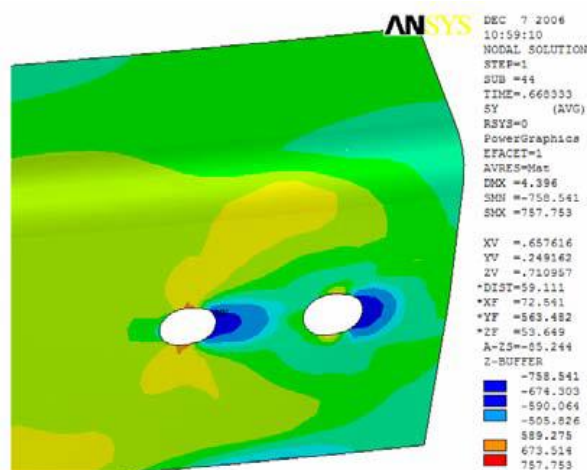


Figura 18. Tensões na direção longitudinal, próximas aos furos da cantoneira E121-L

3.2.4 Cantoneira E111-L

A Figura 19 apresenta as tensões próximas ao furo da cantoneira E111-L e mostra uma pequena deformação surgida na borda do perfil, na direção da solicitação, devido à grande deformação da parede do furo comprimida. A carga de ruptura de ensaio deste perfil ficou em 43,78 kN, enquanto a carga do modelo chegou a 48,56 kN, ou seja, cerca de 11% superior.

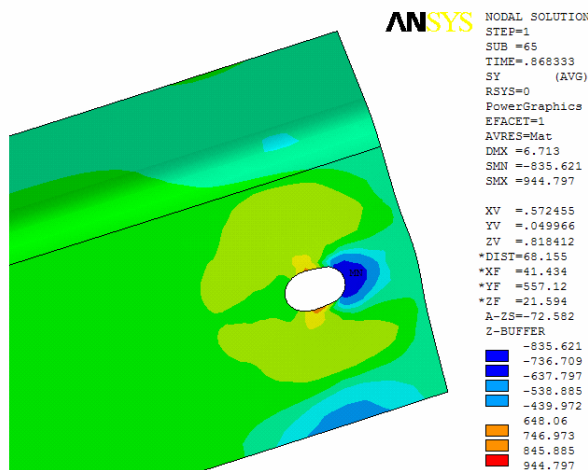


Figura 19. Tensões na direção longitudinal, próximas aos furos da cantoneira E111-L

3.3 Cantoneiras com duas linhas de parafusos

Em cantoneiras com duas linhas de parafusos foram identificadas importantes diferenças. Em quase todos os ensaios, essas cantoneiras apresentaram ruptura da seção líquida e carga de ruptura maior do que aquela obtida com apenas um parafuso por seção. Com o objetivo de verificar a capacidade dos modelos, e também capturar essas diferenças, foram modeladas 4 cantoneiras de abas iguais com duas linhas de parafusos, todas com abas de 100 mm, espessura nominal de 2,25 mm e o comprimento de 600 mm. A Tabela 3 mostra as características das cantoneiras com duas linhas de parafusos.

Tabela 3. Características das cantoneiras com duas linhas de parafusos

Perfil	Aba conectada bc (mm)	Aba desconectada bd (mm)	Espessura real t (mm)	Comprimento real Lt (mm)	Nº de Seções de Furos	Nº de Furos por Seção	Total de furos no Perfil
C112	100	100	2,60	542	1	2	2
C122	100	100	2,66	542	2	2	4
C132	100	100	2,42	542	3	2	6
C142	100	100	2,45	598	4	2	8

3.3.1 Cantoneira C142

A Figura 20 mostra a deformação ocorrida no modelo e o detalhe da malha gerada pelo programa na região dos furos.

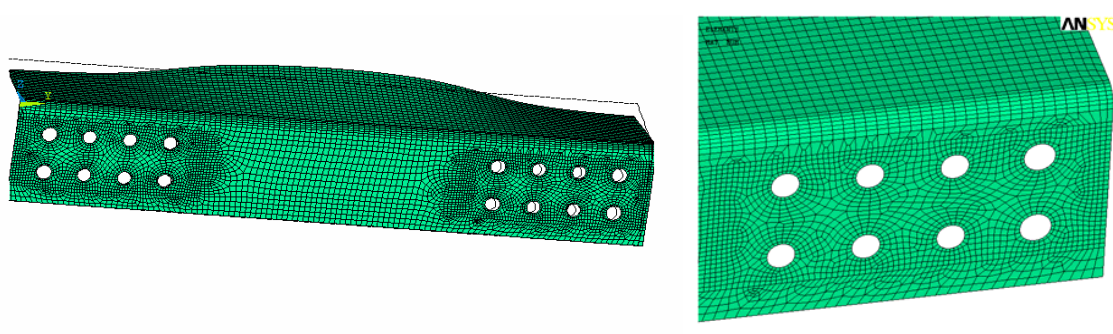


Figura 20. Deformada e detalhe da malha na região dos furos da cantoneira C142

Tanto a deformada desta cantoneira como a localização da seção de ruptura, obtidas na análise numérica, são compatíveis com as informações obtidas nos ensaios, sendo que a carga de ruptura do modelo (124,30 kN) aproximou-se bastante da carga de ensaio (122,42 kN), ficando apenas 1,5% acima desta. A Fig. 21 apresenta a distribuição de tensões na direção longitudinal da cantoneira, na região próxima aos furos, onde pode-se notar o aumento da tensão de tração que provocou a ruptura da seção líquida nos perfis dos ensaios.

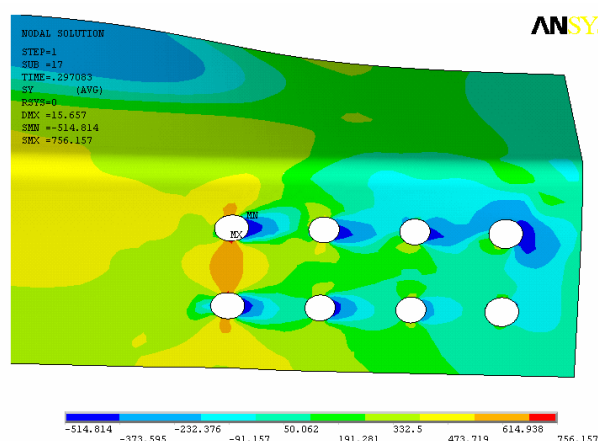


Figura 21. Tensões na direção longitudinal, próximas aos furos da cantoneira C142

3.3.2 Cantoneira C132

Este modelo levou a uma ruptura com carga de 114,71 kN, enquanto no ensaio a carga encontrada foi de 115,90 kN. A carga do modelo ficou, então, apenas 1,0% abaixo da carga experimental. A Fig. 22 mostra as tensões de tração e compressão na ruptura do modelo da cantoneira C132, com evidente identificação da seção de ocorrência da ruptura da seção líquida.

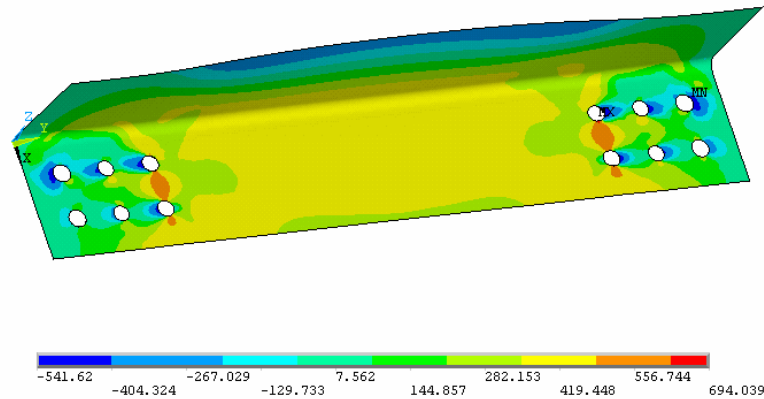


Figura 22. Tensões na direção longitudinal da cantoneira C132

3.3.3 Cantoneira C122

Nesta cantoneira, a carga experimental de colapso ficou em 99,56 kN e a carga de colapso do modelo numérico atingiu 122,75 kN, correspondendo a uma carga cerca de 23% acima da obtida no ensaio. As tensões surgidas na região dos furos da cantoneira C122 são apresentadas na Fig. 23.

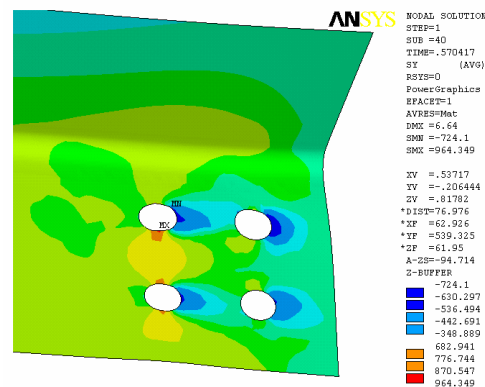


Figura 23. Tensões na direção longitudinal, próximas aos furos da cantoneira C122

3.3.4 Cantoneira C112

A Figura 24 mostra as tensões de *von Mises* e as tensões de tração e compressão na região dos furos da cantoneira C112, com uma seção de parafusos e dois parafusos por seção. Neste modelo, foi obtida uma carga de ruptura de 75,88 kN, correspondendo a uma carga cerca de 8% menor do que a carga obtida no ensaio, de 82,60 kN.

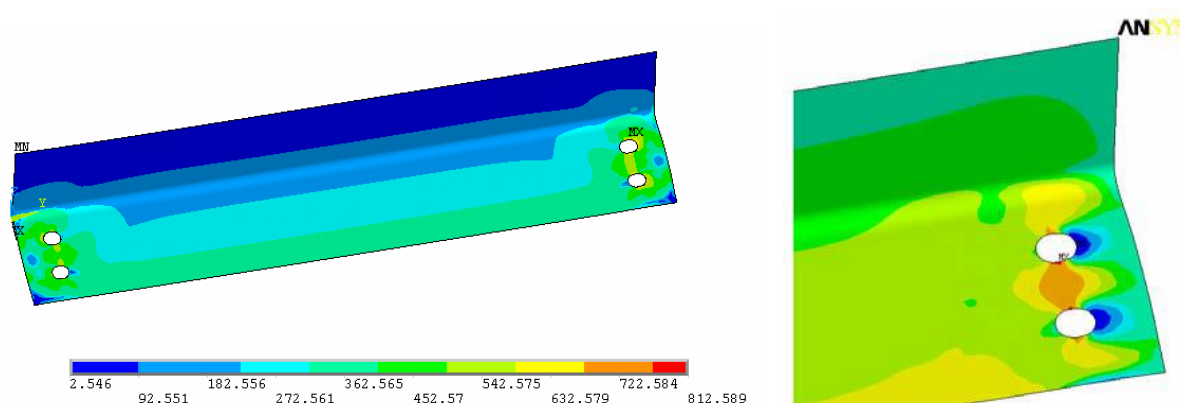


Figura 24. Tensões de *von Mises* ao longo do perfil e tensões de tração e compressão na região dos furos da cantoneira C112

3.4 Avaliação da modelagem numérica de perfis formados a frio

A partir da comparação entre os resultados experimentais e da modelagem numérica dos mesmos perfis, pode-se verificar que inúmeras distorções que afetam diretamente a medida dos deslocamentos podem ocorrer, tanto nos ensaios quanto nos modelos. Por outro lado, a obtenção da carga de colapso do perfil mostrou-se menos sujeita às dificuldades inerentes aos processos de modelagem numérica e montagem dos experimentos de ensaios.

A Tabela 4 resume as diferenças encontradas nas cargas de ruptura produzidas pelos ensaios e pelos modelos de elementos finitos. Essas diferenças podem ser, entre outras causas, devidas aos valores das espessuras das chapas dos perfis, às dificuldades numéricas inerentes às análises não lineares e às diversas restrições de criação de modelos numéricos completamente livres de simplificações.

Tabela 4. Diferenças entre as cargas de colapso dos modelos e dos ensaios

Carga de Ruptura (kN)			
Perfil	Modelo	Ensaio	Diferença
C141	136,07	115,23	18,1%
C131	95,63	110,31	-13,3%
C121	80,83	77,85	3,8%
C111	36,07	44,13	-18,3%
E141-L	116,54	102,71	13,5%
E131-L	87,19	89,63	-2,7%
E121-L	71,91	72,80	-1,2%
E111-L	48,56	43,78	10,9%
C142	124,30	122,42	1,5%
C132	114,71	115,90	-1,0%
C122	122,75	99,56	23,3%
C112	75,88	82,60	-8,1%

É importante considerar também que, no processo de fabricação do aço laminado, a norma brasileira NBR 11.888 (ABNT, 2015) estipula uma tolerância de $\pm 0,20$ mm na espessura de chapas finas laminadas a quente com espessura de 2,25 mm. Esse valor pode

representar cerca de 9% de variação na espessura nominal de perfis com esta espessura, a qual se propaga, também, para o valor da resistência última do perfil.

A média das diferenças absolutas presentes na Tabela 4 é de 9,7%, com as maiores diferenças chegando a 23,3% e as menores a 1,0%. Percebe-se, então, que os modelos construídos permitem estimar com boa precisão o valor da carga de ruptura e o modo de deformação de um perfil formado a frio, como aqueles apresentados neste trabalho.

4 CONCLUSÃO

O presente artigo foi capaz de avaliar o comportamento das cantoneiras de aço formadas a frio. Foram obtidos resultados positivos tanto na análise experimental quanto na numérica com os quais se chega as seguintes conclusões:

- ✓ O emprego da equação de Ramberg e Osgood (1943) para a descrição da não linearidade existente entre a tensão e a deformação obtidas nos ensaios uniaxiais de tração, com resultados expressos em termos de tensão e deformação real, apresentou-se como um procedimento para a modelagem numérica de cantoneiras formadas a frio por elementos finitos tipo casca que possibilitou a obtenção de resultados de carga de ruptura equivalentes àqueles determinados por ensaios experimentais.
- ✓ As deformadas dos perfis ensaiados são bem representadas pelos modelos numéricos de elementos finitos que incorporam análises de grandes deformações e grandes deslocamentos, simulando adequadamente as deformações e tensões surgidas nas abas e nos furos das cantoneiras.

A partir dos resultados encontrados, demonstra-se viável o uso da modelagem numérica por elementos finitos na obtenção de coeficientes que indiquem a carga de ruptura das ligações parafusadas em perfis formados a frio, permitindo assim o seu uso concomitante com ensaios experimentais, de maneira a reduzir custos e a duração destas atividades.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio a esta e a outras pesquisas à: Universidade de Brasília, o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG Campus Goiânia e às Agências de fomento CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. Supplement n. 1 to the specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington DC, 1999.
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. North American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington DC, 2016.
- ANSYS. Ansys 5.4 Theory Reference Manual. Ansys, Inc. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT (2015). NBR 11.888 – Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço-carbono e de aço de alta resistência e baixa liga – Requisitos gerais. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT (2010). NBR 14.762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio –Procedimento. Rio de Janeiro. 2010.

Bakker, M. C. M; Peköz, T., 2003. The finite element method for thin-walled members – basic principles. *Thin-Walled Structures*, v. 41.

Chung, K. F. e Ip, K. H., 2000. Finite element modelling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading. *Engineering Structures*, v. 22, p. 1271-1284.

Chung, K. F. e Ip, K. H., 2001. Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections. *Engineering Structures*, v. 23, p. 1115-1125.

LaBoube, R. A. e Yu, W. W., 1995. Tensile and bearing capacities of bolted connections. *Final Summary Report, Civil Engineering Study 95-6*. University of Missouri-Rolla.

Maiola, C. H., 2004. Ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

PadmaPriya, R. e Kandasamy, S., 2010. Study on the behaviour of cold-formed steel angle tension members. In. *20th. International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. St. Louis, Missouri, U.S.A.

PadmaPriya, R., 2015. Study on behaviour of bolted cold-formed steel angle tension members. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol., 8(S7), p. 102-109. Sathyabama University, Chennai, India.

Ramberg, W. e Osgood, W. R., 1943. Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC.

Taylor, J., 2000. Colin. More Work is Required. In: *Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures*, Roanoke-VA.

Teh, L. H. e Gilbert, B. P., 2013. Net section tension capacity of cold-reduced sheet steel angle braces bolted at one leg. *Journal of Structural Engineering*, Vol., 139 (3), 328 – 337. University of Wollongong, Austrália.

Teh, L. H. e Gilbert, B. P., 2014. Net section tension capacity of equal angle braces bolted at different legs . *Journal of Structural Engineering*, 06014002. University of Wollongong, Austrália.

Yip, A. S. M. e Cheng, J. J. R., 2000. Shear lag in bolted cold-formed steel angles and channels in tension. *Structural Engineering Report n° 233*, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada.

Yu, W. W., 2000. *Cold-formed Steel Design*, In New York, John Wiley e Sons, 3rd Ed.