



COMPARAÇÃO DO USO DE ELEMENTOS DE CASCA E SÓLIDO APLICADOS EM CHAPAS VIA MEF

Diego Luiz Costa e Souza ^a

Lucas Roquete ^{a,b}

Arlene Maria Cunha Sarmanho ^b

Ana Amélia Oliveira Mazon ^a

Matheus Miranda Oliveira ^b

Guilherme Cássio Elias ^b

diego-7-souza@hotmail.com

lucasroquete@gmail.com

arlene.sarmanho@gmail.com

anaom21@yahoo.com.br

theus.mo@gmail.com

gc.elias@yahoo.com.br

^aDepartamento de Tecnologia em Engenharia Civil Computação e Humanidades, Universidade Federal de São João del Rei -UFSJ- Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, MG, Brazil

^bPrograma de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil

Abstract. Perfis em estruturas de aço são amplamente empregados em todo o mundo, aumentando o desenvolvimento de novas pesquisas para o aprimoramento de técnicas que possibilitem o dimensionamento. Este trabalho apresenta um estudo numérico comparativo entre dois tipos de elementos que são empregados em análises numéricas computacionais, o tipo casca e o tipo sólido. Os elementos foram aplicados em chapas submetidos à tração. Os modelos numéricos foram desenvolvidos usando o método dos elementos finitos, MEF, com uso do software ANSYS. As chapas possuíam seção retangular com e sem furos. Desta forma foi possível analisar os diferentes comportamentos entre os tipos de elementos e avaliar a influência do uso de elementos tipo casca e o tipo sólido para simulação dessa configuração geométrica em termos de custo computacional e do comportamento estrutural dos modelos.

Keywords: Análise numérica, elementos de casca, elementos de sólido, chapas tracionadas.

CILAMCE 2017

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

INTRODUÇÃO

Perfis em aço possuem ótimo desempenho estrutural aos esforços de tração. Seu uso compreende uma extensa aplicação no campo de engenharia, seja em estruturas fixas, como edifícios, pontes, etc., ou estruturas móveis, nas indústrias ferroviárias, automobilísticas, naval. No caso de elementos tracionados pode-se exemplificar o uso em sistemas treliçados.

Dentre algumas vantagens do uso de aço pode-se destacar a redução no tempo de construção, racionalização no uso de materiais e mão de obra, aumento da produtividade e ainda, dependendo da tipologia de perfil, proporcionar maior harmonia com o ambiente, ideal para melhores aspectos estéticos. A Figura 1 apresenta uma edificação construída em aço, estrutura esbelta e os fechamentos de vidro produzem um efeito de leveza e luminosidade. A opção pelo aço, em vez do concreto, permitiu a criação de colunas e vigas de dimensões reduzidas (Figueirola e Finotti, 2007).



Figura 1. Edificação em aço.

Fonte: Figueirola e Finotti (2007).

Visando a aplicabilidade desse material inúmeros estudos são realizados, em âmbito teórico, numérico e experimental com o objetivo de desenvolvimento de novas técnicas e propostas de metodologias para o aperfeiçoamento do dimensionamento.

Há no mercado diversos softwares comerciais para realização de análises numéricas. A análise numérica via elementos finitos deve representar adequadamente a situação que será analisada. Portanto, a construção do modelo numérico deve ser sistemática com a finalidade de uma boa representação. A escolha dos elementos finitos empregados nas análises é essencial para resultados adequados.

Este trabalho tem como objetivo a avaliação de um modelo numérico para chapas de aço submetidos à esforço de tração modelados com elementos de casca e de sólido e comparação dos resultados para futuras decisões de aplicação em modelos com esforços semelhantes aos analisados. Serão avaliados um elemento tipo casca (SHELL) e um elemento tipo sólido (SOLID), além do emprego de elementos de contato na região da ligação, aplicados em uma chapa plana de aço furada com a presença de um parafuso. Os resultados numéricos serão comparados com resultados teóricos, para modos de falha indicados em Salmon e Johnson (2009), e de acordo com as prescrições da ABNT NBR 8800 (2008).

1 ANÁLISE NUMÉRICA

Para avaliação do comportamento dos modelos utilizou-se a versão estudantil do software ANSYS 17.1. Neste item são apresentadas as características e propriedades do modelo numérico em análise.

1.1 Modelo numérico

Para a criação do modelo numérico foi definido a utilização de uma chapa retangular de aço. Para avaliação numérica desse modelo utilizou-se o Método dos Elementos Finitos com o emprego do software ANSYS 17.1 (ANSYS, 2009). De acordo com a tipologia de ligação em análise os aspectos dos modelos de elementos finitos são descritos a seguir.

O modelo foi gerado considerando uma chapa de Aço AR 350 COR de dimensões (400 mm x 250 mm x 20 mm) e para uma chapa de mesmas dimensões e material com um parafuso acoplado, ASTM A325 em sua seção intermediária com diâmetro de 15,875 mm e comprimento de 100 mm. As características mecânicas usadas nas análises estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos modelos

Chapa				Parafuso			
f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)
350	0,175	485	17,5	635	0,326	825	32,6

Para permitir a transmissão dos esforços entre a chapa e o parafuso foram utilizados os elementos de contato. O parafuso foi deslocado para eliminar a folga existente entre os parafusos e os tubos. Evitando dessa maneira deslocamentos de corpo rígido devido a folga entre o parafuso e a chapa.

A configuração geométrica para os dois modelos, criados como áreas, para aplicação dos elementos de casca, e criados como volume, para aplicação dos elementos sólidos, respectivamente, é apresentada na Fig. 2 (a) e Fig. 2 (b).

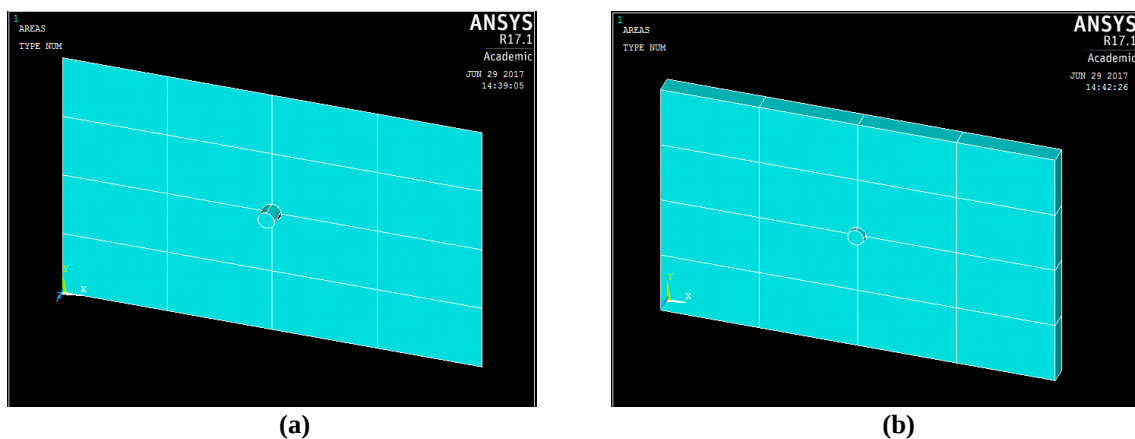


Figura 2. Configuração do modelo da chapa: (a) tipo casca (b) tipo sólido

1.1.1 Elementos

Os dois tipos de elementos utilizados foram: o elemento tipo casca SHELL e o tipo sólido SOLID para representar as chapas e para modelar os parafusos somente o tipo sólido SOLID dentro dos elementos disponíveis no programa Ansys.

O elemento sólido escolhido foi o SOLID186, Fig. 3. Este é um elemento de sólido estrutural homogêneo de ordem superior que possui 20 nós e que aceita malhas irregulares, possibilitando a aplicação de carga em qualquer direção. O elemento possui três graus de liberdade por nó. Este elemento foi escolhido por se tratar de uma atualização do elemento SOLID185, sucessor do elemento SOLID45, que permite a consideração de efeitos importantes como, por exemplo, a plasticidade do material. É um elemento amplamente utilizado em trabalhos de análise numérica com ligações tubulares, como em Viera (2014) e Martinez-Saucedo, Packer, Willibald (2006). Como este trabalho será extrapolado para uso em perfis tubulares optou-se pela utilização desse elemento.

Para as cascas foi escolhido o elemento SHELL181, Fig. 4, que é um elemento estrutural homogêneo de casca com quatro nós que aceita malhas irregulares, possibilitando também a aplicação de carga em qualquer direção. Este elemento possui seis graus de liberdade por nó (translações e rotações em X, Y e Z). Este elemento foi escolhido pois adapta-se bem para análises não lineares e também possui capacidade plástica. O elemento é bem atual e muito empregado na modelagem de perfis tubulares (que será uma extrapolação desse trabalho) com em trabalhos de Michillo (2011), Vieira (2014), Amparo et al (2015) e Amparo et al (2016).

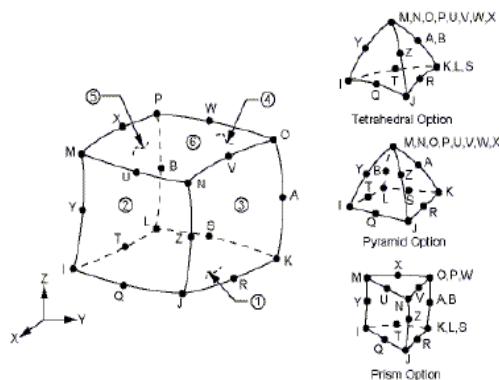


Figura 3. Elemento sólido SOLID 186 (Fonte: ANSYS2009)

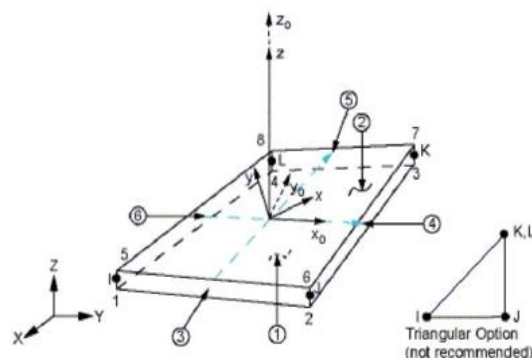


Figura 4. Elemento de casca SHELL 181 (Fonte: ANSYS 2009)

O modelo numérico também leva em consideração o contato entre as áreas dos furos dos tubos com as áreas laterais dos parafusos utilizando os pares de elementos contato do Ansys. Para os modelos com elementos tipo casca SHELL o contato se deu nó com superfície de contato (Node-to-Surface) elementos TARGE170 e CONTA175, Fig.5. E para os modelos com elementos tipo sólido SOLID o contato foi simulado com as superfícies de contato (Surface-to-Surface), utilizando elementos TARGE170 e CONTA174, Fig.5.

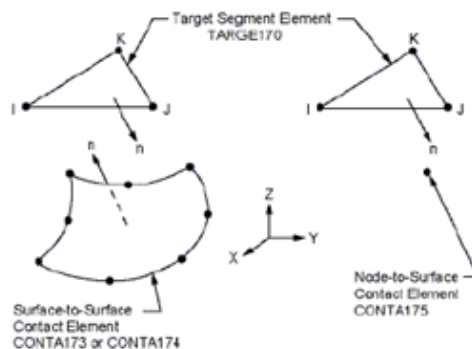


Figura 5. Elementos do par e contato superfície-superfície: CONTA 174 e TARGE 170 e do par de contato nó-superfície: CONTA 175 e TARGE 170. (Fonte: ANSYS 2009)

1.1.2 Malha e Condição de contorno

A geração da malha em um modelo pode ser feita de forma livre ou mapeada. Nos modelos estudados utilizou-se a malha livre, Fig. 6. Porém para uma melhor organização da malha, foram feitas subdivisões nas áreas para criação de linhas adicionais, como comentado em Amparo et al (2015). Como as análises foram realizadas em uma versão estudantil do software ANSYS, que restringe a quantidade de nós dos modelos, optou-se por adotar o tamanho da malha igual a 11 mm para ambos os tipos de elementos, SHELL181 e SOLID186. O ideal é a realização de um estudo com tamanhos de malhas diferentes, porém devido a limitação da versão do programa este tamanho foi adotado e apresentou resultados adequados.

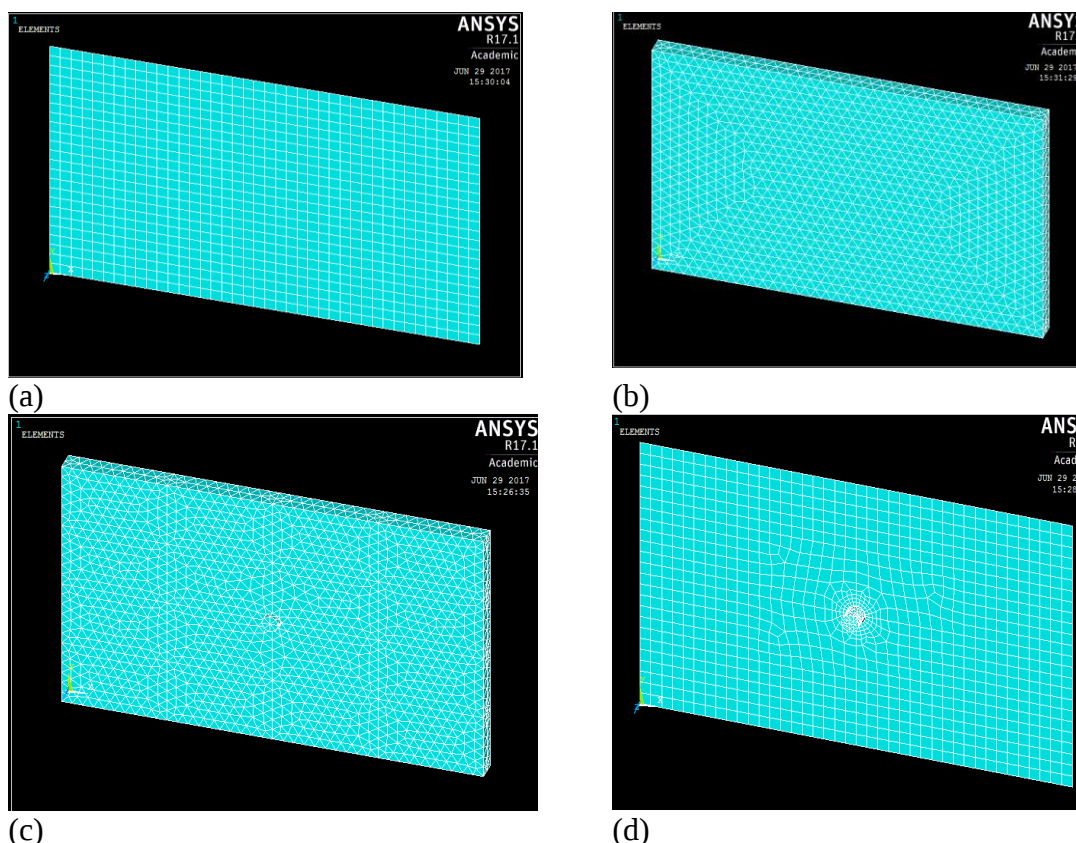


Figura 6. Elementos do par e contato superfície-superfície: CONTA 174 e TARGE 170 e do par de contato nó-superfície: CONTA 175 e TARGE 170. (Fonte: ANSYS 2009)

Para estabelecer as condições de contorno, os nós das extremidades da chapa foram acoplados de forma que o deslocamento aplicado fosse igualmente distribuído ao longo da seção transversal da chapa (Fig. 7). Nestes nós, em uma das extremidades foram aplicados deslocamento e rotação de 0 mm (em todas as direções), simulando o engaste da peça. Na outra extremidade aplicou-se um deslocamento de 7 mm (na direção horizontal), simulando a tração imposta sobre a peça, uniformemente distribuída pelos nós.

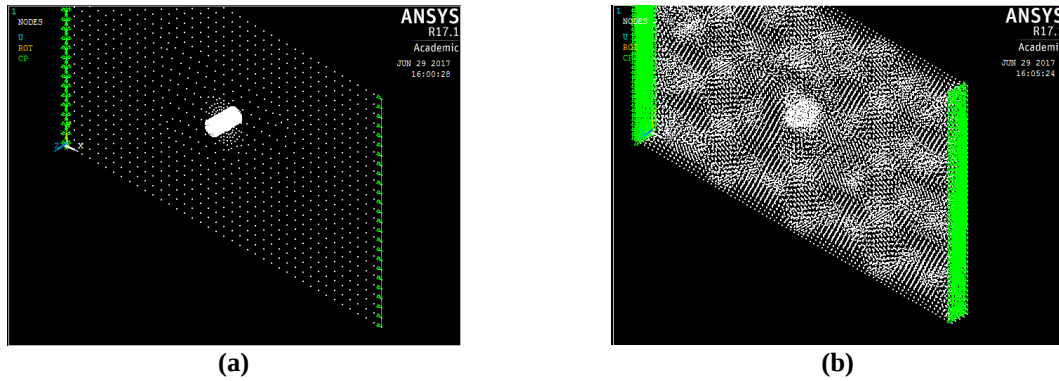


Figura 7. Condições de contorno: (a) tipo casca (b) Tipo sólido

Esse deslocamento foi aplicado por ser 10 vezes maior que o de início de escoamento, 0,7 mm, facilitando a visualização do patamar de escoamento do material. O valor de 0,7 mm foi obtido por meio da análise teórica da força axial resistente, para escoamento da seção bruta, Eq. (1), fornecida pela ABNT NBR 8800 (2008), sem a ponderação da resistência. Com a força resultante obteve-se o valor do deslocamento, Eq.(2), Hibbeler (2010). Nesta etapa do trabalho foi priorizada análise apenas na fase elástica, não se trabalhando com a força de ruptura.

- **Escoamento da Seção Bruta**

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (1)$$

$N_{t,Rd}$ - Força axial de tração resistente de cálculo;

A_g - Área bruta da seção transversal da barra;

f_y - Tensão resistente de escoamento do aço;

γ_{a1} - Coeficiente de ponderação da resistência.

- **Deslocamento**

$$\Delta = \frac{FL}{EA} \quad (2)$$

Δ – Deslocamento;

F – Força aplicada;

L – Comprimento da barra;

E – Módulo de Elasticidade;

A – Área da seção transversal da barra.

1.2 Solução não linear

Foi utilizada a linguagem de programação do software ANSYS, APDL (Ansys Parametric Design Language) com o objetivo de automatizar a construção do modelo e facilitar futuras variações de geometria com controle de todas as características inseridas no modelo numérico.

Foi feita uma análise não linear considerando as propriedades mecânicas do aço, empregando o método iterativo de Newton-Raphson. Nesta análise houve a aplicação de deslocamento ao invés da aplicação de força, como descrito anteriormente. O deslocamento, no sentido do comprimento do perfil, é imposto nos nós de extremidades e com isso são obtidas as reações de carregamento.

Com relação a não linearidade do material, foi utilizado material multilinear (Multilinear Isotropic Hardening) com três pontos para representar a curva tensão versus deformação do aço dos tubos e parafusos, as deformações correspondentes ao final de cada trecho foram definidas com base no diagrama tensão versus deformação dos aços de alta resistência e baixo carbono apresentado por Salmon e Johnson (1990), mesma empregada em Amparo et al (2016). A configuração para os parafusos está representada na Fig. 8(a) e para as chapas na Fig. 8(b).

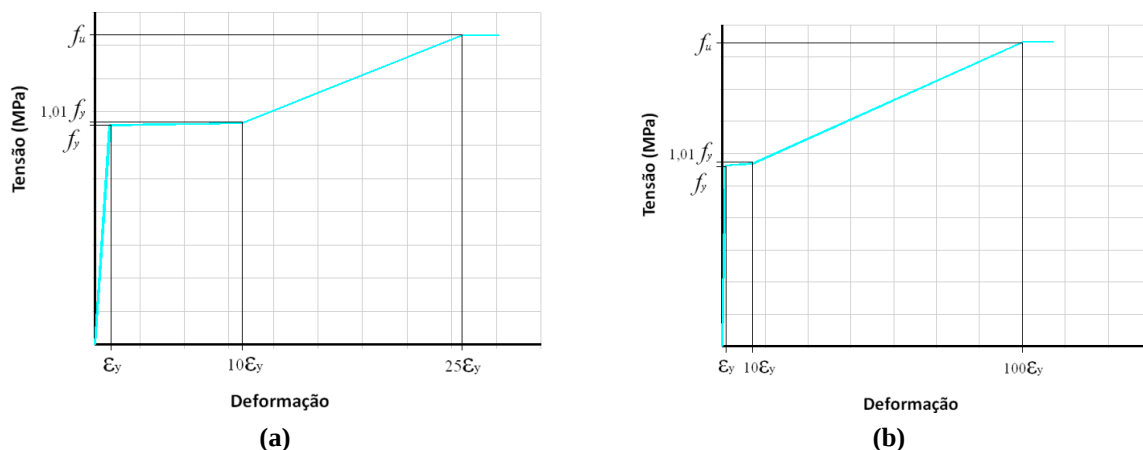


Figura 8. Relação constitutiva dos materiais

Neste trabalho poderia ter trabalhado com um modelo elastoplástico perfeito, com uma curva tensão *versus* deformação diferente das apresentadas. Porém, para futuras análises na fase plástica, optou-se por essa configuração de comportamento.

2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta a comparação dos resultados numéricos e teóricos, bem como uma comparação entre os modelos com elementos tipo casca (SHELL) e tipo sólido (SOLID).

Nas Fig. 9 e Fig.10 são apresentadas curvas de Força *versus* Deslocamento para os modelos numéricos, com deslocamento aplicado de 7 mm (fase elástica). É possível observar uma relação linear de proporcionalidade entre a força e o deslocamento, para pequenos deslocamentos, seguida de uma tendência de força constante com aumento de deslocamento, caracterizando o escoamento da seção bruta nos modelos. O ponto onde houve

a mudança de inclinação da curva foi tomado como o valor de força que provoca o escoamento da seção dos modelos.

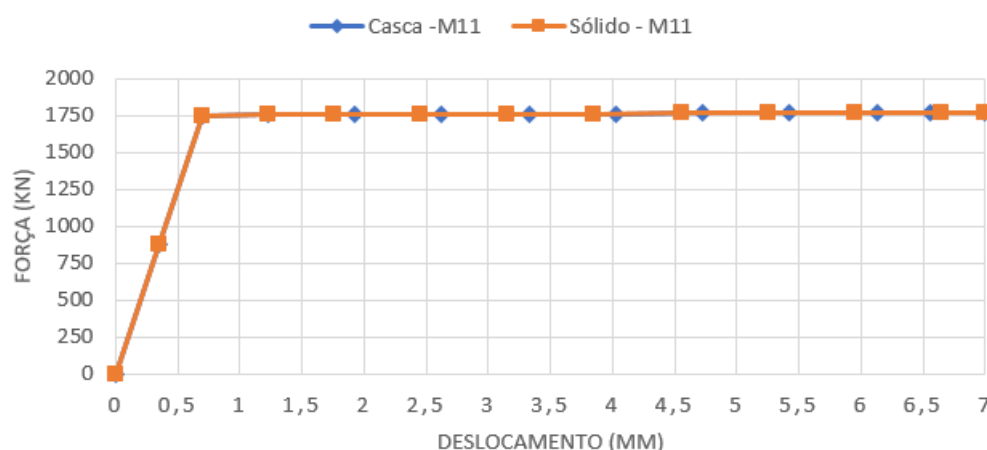


Figura 9. Gráfico Força x Deslocamento – Chapas sem parafuso

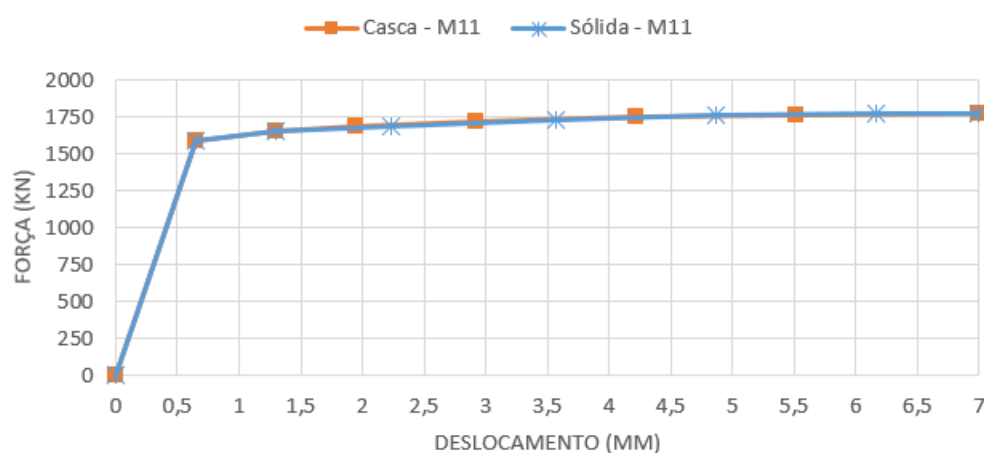


Figura 9. Gráfico Força x Deslocamento – Chapas com parafuso

A Tabela 2 apresenta os valores referentes ao resultado teórico, segundo a formulação da ABNT NBR 8800 (2008), e aos modelos numéricos referentes aos modelos, sem o parafuso, com casca e com sólido, para o estado limite de escoamento da seção bruta.

Tabela 1 - Forças resultantes das análises

Força (kN) – Sem Parafuso	
Teórico	1750,0
Chapa com Casca	1750,0
Chapa com Sólido	1749,8

Pelas curvas das Fig. 9 e Fig. 10, bem como a Tabela 2, observa-se que os valores obtidos pelo método numérico se mostraram, no caso de casca, igual, e no caso de sólido, bem próximo, ao obtido pelo método teórico, Eq. (1), quando não minorados pelo coeficiente de ponderação da resistência. Com relação aos tipos de elementos utilizados, casca e sólido, neste caso, não foi observado nenhuma diferença significativa dos resultados, concluindo que ambas as opções de modelo condizem adequadamente ao esperado, referentes ao comportamento na fase elástica. A presença do parafuso nos modelos (furos na seção) pode associar a ruptura da seção líquida (seção mais fragilizada), sendo ideal uma análise mais criteriosa, na fase plástica, aplicando maiores deslocamentos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo para a verificação de um modelo numérico que apresente resultados satisfatórios quanto a resistência ao esforço axial de tração em perfis de aço e uma comparação de qual tipo de elemento disponível no software ANSYS seria mais indicado na elaboração e análise do modelo.

A análise teórica foi realizada com as prescrições da ABNT NBR 8800, enquanto que para a análise numérica foi desenvolvida via método dos elementos finitos (MEF) através do software ANSYS. Ressaltando que esse método, usualmente aplicado no desenvolvimento de novos estudos, é bastante consagrado.

O estudo, realizado na fase elástica, apresentou resultados satisfatórios, uma vez que os resultados convergiram para um mesmo modo de falha e uma mesma carga. Portanto, os critérios descritos anteriormente na elaboração deste modelo encontram-se adequados e podem ser utilizados nas modelagens e análises futuras.

A comparação entre os elementos tipo casca (SHELL) e tipo sólido (SOLID), não tiveram uma divergência entre eles para os parâmetros das chapas adotados, apontando qual seria o melhor, e permitindo assim, o uso de ambos. Contudo, o elemento tipo sólido possui número de nós muito mais elevando do que um elemento de casca gerando um aumento considerável no tempo de processamento, portanto só é justificável utilizar um elemento tipo sólido se os resultados fossem melhores que o elemento tipo casca.

Vale ressaltar que este é um estudo inicial e que para uma análise mais criteriosa e comprovação desse resultado deve-se variar os tipos de seções das chapas, o material das mesmas e a quantidade de parafusos. Além disso, avaliar o comportamento do modelo na fase plástica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFSJ, UFOP, CAPES, CNPq e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

ABNT 2008. NBR 8800, 2008. *Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios*. - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Amparo, L. R., Escanio, L. A., Freitas, A. M. S., Pereira, C. O.V.R., Requena, J. A. V., 2015. Análise numérica e experimental de ligação tipo luva em perfis tubulares com parafusos

cruzados connections. *XXXVI Ibero-Latin American Congress in Computational Methods in Engineering – CILAMCE2015*, Rio de Janeiro, Brazil.

Amparo, L. R., Escanio, L. A., Freitas, A. M. S., Requena, J. A. V., 2016. Avaliação da influência da variação do número de parafusos na ligação tipo luva em perfis tubulares com parafusos cruzados. *XXXVII Ibero-Latin American Congress in Computational Methods in Engineering – CILAMCE2016*, Brasília, Brazil.

ANSYS, 2009. User's Manual. Help, Inc. theory reference (version 17.1).

Figuerola, V. N. e Finotti, L., 2007. Transparência da paisagem. Estrutura metálica torna-se aliada na obtenção de um volume arquitetônico leve e elegante. *Arquitetura-Urbanismo – PINI*, ed. 161, artigo 58407, ago 2007.

Hibbeler, R. C., 2010. *Resistência dos Materiais*. 7. ed. -São Paulo: Pearson Prentice Hall.

Martinez-Saucedo, G., Packer, J. A., Willibald, S., 2006. Parametric finite element study of slotted end connections to circular hollow sections. *Engineering Structures*, v. 28, p.1956-1971, 2006.

Salmon, C. G. e Johnson, J. E., 1990. *Steel Structures – Design and Behavior*. Emphasizing Load and Resistance Factor Design. 3th Edition.

Salmon, C. G. e Johnson, J. E. 2009. *Steel Structures – Design and Behavior*. EUA: Pearson.

Vieira, R. C., 2014. Análise numérica e experimental de ligações tubulares de aço do tipo luva parafusada. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.