

Tema: Ligações: concepção, projeto e elementos de fixação

## MODELAGEM DE ELEMENTOS E LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS DE AÇO COMBINANDO ELEMENTOS FINITOS DE VIGA E CASCA

Samara Giacometti Brugnaroto<sup>1</sup>

Fábio Goedel<sup>2</sup>

Zacarias M. Chamberlain Pravia<sup>3</sup>

### Resumo

Ao realizar-se uma análise pelo método dos elementos finitos para avaliar o comportamento de uma estrutura de aço, diferentes tipos de elementos finitos podem ser utilizados tais como, elementos de viga, placas e ou cascas e sólidos. A escolha do tipo de elemento, bem como o tamanho do mesmo, são tarefas que devem ser realizadas pelo Engenheiro Estrutural, levando em conta o comportamento mecânico que se deseja simular, sendo que a formulação do elemento finito deve ser conhecida para que a escolha seja feita corretamente. No presente trabalho através de um caso de estudo de uma viga W com ligações em dupla cantoneira apoiada numa coluna foram avaliadas três alternativas: (a) só usando elementos sólidos, (b) Só usando elementos de casca e (c) misturando elementos de viga e casca. Os resultados mostram diferenças nos resultados que cabem nas tolerâncias de respostas estruturais para a análise desse tipo de estruturas, porém, apresentando uma vantagem na redução de número de graus de liberdade e por conseguinte no tempo computacional de realização das análises estruturais.

**Palavras-chave:** Modelagem elementos finitos; estruturas de aço; malhas mistas.

## MODELING ELEMENTS AND CONNECTIONS OF STEEL STRUCTURES COMBINING FINITE ELEMENTS OF BEAM AND SHELL

### Abstract

When performing a structural analysis by finite element method in steel structure, different types of finite elements can be used such as beam elements, and plates or shells and solids. The choice of the type of element, as well as the element size, are tasks that must be performed by the structural engineer, taking into account the mechanical behavior of the elements involved and the finite element formulation must be known for each kind to choice the right option. In this work through a case study of a W beam with double angle connections at the ends connected to a column were evaluated three alternatives: (a) only using solid elements, (b) using shell elements and (c) mixing elements of beam and shell. The results show differences that fit the tolerances of responses for the analysis of such structures, however, showing a reduction in the number of degrees of freedom, reducing the time of computer use.

**Keywords:** Finite Element Modeling; Steel Structures; mixed mesh.

<sup>1</sup> Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, Brasil, samarabrugnaroto@hotmail.com.

<sup>2</sup> Engenharia Mecânica, Mestre, Professor, FEAR, Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, Brasil, goedel@upf.br.

<sup>3</sup> Engenharia Civil, Doutor, Professor Titular, PPGEng, FEAR, Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, Brasil, zacarias@upf.br.

## 1. INTRODUÇÃO

Ao realizar-se uma análise pelo método dos elementos finitos para avaliar o comportamento de uma estrutura de aço, diferentes tipos de elementos finitos podem ser utilizados tais como, elementos de viga, placas e ou cascas e sólidos. A escolha do tipo de elemento, bem como o tamanho do mesmo, são tarefas que devem ser realizadas pelo Engenheiro Estrutural, levando em conta o comportamento mecânico que se deseja simular, sendo que a formulação do elemento finito deve ser conhecida para que a escolha seja feita corretamente. Mesmo com o avanço da computação em termos de processamento de dados, frequentemente os engenheiros se deparam com problemas estruturais que demandam um longo tempo para solução, devido à complexidade de partes componentes da estrutura (por exemplo, elementos de ligações), relações constitutivas não lineares (plasticidade), descontinuidades entre os componentes (contatos), grandes deslocamentos, as quais merecem um cuidado adicional para que se obtenham resultados satisfatórios e coerentes com a realidade de utilização da estrutura.

A utilização de malha mista, na qual diferentes tipos de elementos finitos são utilizados conjuntamente na idealização do modelo de elementos finitos, tem como objetivo reduzir consideravelmente o tempo de processamento da análise, sem perder precisão nos resultados, no entanto deve-se tomar alguns cuidados ao fazer as conexões entre os elementos, pois devido a diferença no número de graus de liberdade dos nós de cada elemento, deve-se usar técnicas adequadas para não comprometer a acurácia dos resultados. A utilização desta técnica principalmente em problemas dinâmicos e/ou não lineares, torna-se obrigatória, pois nesses tipos de análises as equações de equilíbrio são resolvidas diversas vezes durante a solução do problema, pois são utilizadas técnicas incrementais, sendo que em cada incremento deve-se obter a convergência da análise. Um bom modelo de elementos finitos, deve aliar ao mesmo tempo boa precisão nos resultados com tempo de processamento reduzido.

O presente trabalho procura avaliar o uso de elementos mistos na modelagem de elementos e ligações de estruturas de aço, para isso apresentam-se as análises de uma viga com suas ligações em dupla cantoneira soldada-aparafusada submetidas a flexão através de diferentes modelos de elementos finitos, utilizando malha mista com elementos de casca e viga, comparando-se a precisão dos resultados e o tempo para obtenção da solução do modelo misto com os obtidos com modelos de casca e sólido.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar a ligação com dupla cantoneira soldada-aparafusada, foi utilizada a análise numérica pelo método de elementos finitos, sendo que as etapas a seguir descrevem os procedimentos utilizados para a modelagem numérica do problema. Os dispositivos responsáveis pela união entre a viga, item 1, e a coluna, item 2 da Figura 1, são formados por duas cantoneiras, item 3, sendo que uma das abas é soldada à viga e a outra aba presa à coluna por dois parafusos, item número 4. Ainda, quando as ligações são feitas com as mesas de uma coluna, deve ser considerado um par de enrijecedores na alma da coluna, conforme item 5, com área superior ou igual à mesa inferior da viga.

---

\* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

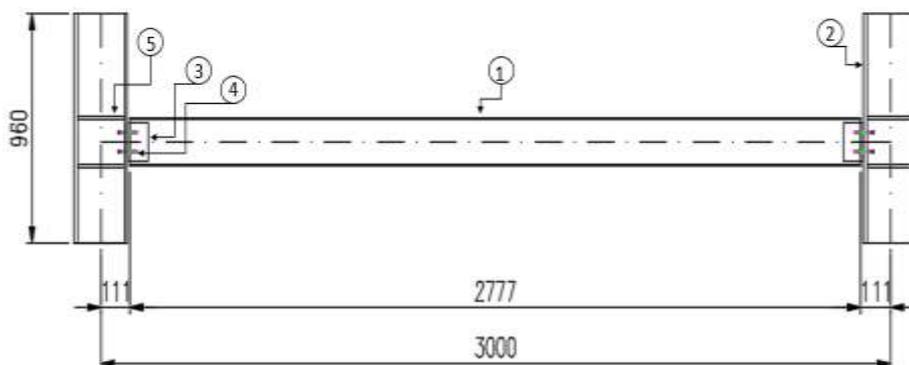


Figura 1 - Modelo de pórtico analisado para ligação com dupla cantoneira soldada-aparafusada

Com módulo de elasticidade (E) igual a 200 GPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) em regime elástico igual a 0,3, foram adotados os perfis laminados Gerdau Açominas W 150x18.0 para as vigas e W 200x46.1 para as colunas, ambos em aço A572 GR50, com tensão limite de escoamento ( $f_y$ ) igual a 345 MPa e tensão limite de ruptura ( $f_u$ ) equivalente a 450 MPa, conforme propriedades geométricas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis utilizados

Bitola	Massa Linear (kg/m)	d (mm)	$b_f$ (mm)	Espessura		h (mm)	d' (mm)	$I_x$ (mm <sup>4</sup> )
				$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)			
<b>W 150x18.0</b>	18	153	102	5.8	7.1	139	119	939
<b>W 200x46.1</b>	46.1	203	203	7.2	11.0	181	161	4543

(Fonte: Gerdau, 2015)

Quanto aos dispositivos responsáveis pela união, foram utilizadas cantoneiras com perfil L 3"x3/8", soldada na viga e aparafusada na mesa da coluna, garantida por dois parafusos tipo 5/8"x2" cada lado, assim como um par de enrijecedores soldados em ambos os lados internos do perfil da coluna com chapa 9.5mm. Tais materiais podem ser verificados de acordo com as dimensões e características apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Dimensões e características do perfil utilizado

Perfil	b		Peso (Kg/m)	t		Material	$F_y$ MPa	$F_u$ MPa
	(pol)	(mm)		(pol)	(mm)			
<b>L 3"x3/8"</b>	3"	76.2	10.71	3/8"	9.52	A36	250	400

(Fonte: Gerdau, 2015)

Tabela 3 - Dimensões e características dos fixadores utilizados

Descrição	Material	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)
<b>Paraf. 5/8"x2"</b>	A325	635	825
<b>Chapas 9,5 mm</b>	A572 Gr.50	345	450

## 2.1 Modelagem Numérica

Através da Figura 2 é possível observar os modelos geométricos da união soldada-aparafusada entre viga e coluna com dupla cantoneira que foram estudados para análise

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

numérica através do Método dos Elementos Finitos, de modo a serem analisados empregando elementos finitos sólidos (a), de casca (b) e malha mista com casca e viga(c).

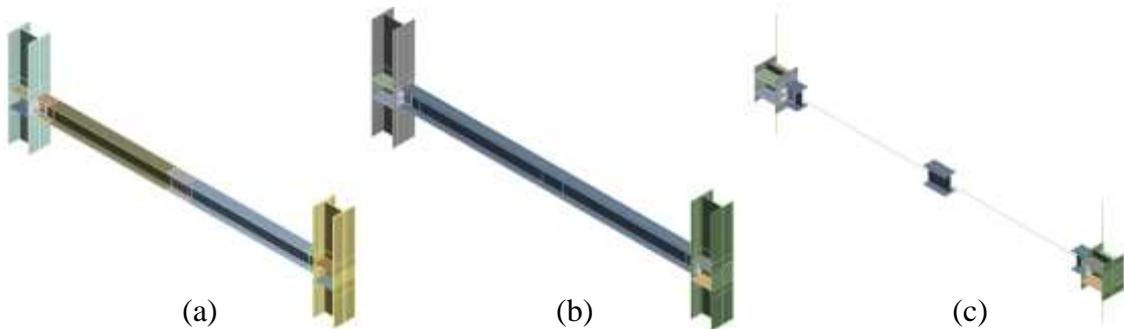


Figura 2 – Modelos analisados utilizando (a) Elementos sólidos, (b) Elementos de casca e (c) elementos de casca e viga

A modelagem do conjunto da ligação com dupla cantoneira soldada-aparafusada foi preparada levando em conta os cuidados necessários para a discretização do modelo de elementos finitos. Desta forma, é possível observar subdivisões e mapeamento das malhas, a fim de possibilitar maior qualidade da malha de elementos finitos, principalmente nas áreas de maior interesse da análise, nas quais foram feitos testes de convergência dos resultados.

Conforme mencionado anteriormente, foram gerados três tipos de modelos com a discretização da malha utilizando elementos sólidos, de casca e casca/viga, os quais são apresentados nas seções abaixo. Os tamanhos dos elementos finitos utilizados nas peças são apresentados nas figuras onde são mostradas as malhas de cada componente, os quais em regiões de maior interesse foram de 3mm e em regiões de menor interesse utilizou-se 5mm. Conforme visualizado na Figura 3, para os modelos sólidos utilizou-se o elemento hexaédrico de vinte nós, já nos modelos de casca o elemento quadrilateral de oito nós e, por fim, no modelo casca/viga utilizou-se o elemento quadrilateral de oito nós e o elemento de viga (beam) conforme Figura 3 (c), o qual corresponde a um elemento linear com seis graus de liberdade em cada nó, em que as três translações nodais e três rotações nodais ocorrem em relação aos eixos x, y e z, sendo a formulação do elemento baseada na teoria de Timoshenko.

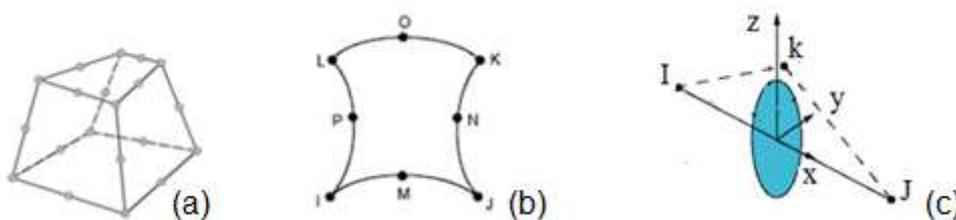


Figura 3 – Elementos utilizados  
(Fonte: Adaptado de ANSYS, 2015)

### 2.1.1 Discretização do conjunto utilizando elementos sólidos

Nas Figuras 4, 5 e 6 são mostradas as malhas geradas com elementos sólidos, nas quais pode ser observado que manteve-se três elementos na espessura das chapas. Entretanto,

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

todos os modelos apresentam 64 elementos na circunferência dos furos, caracterizando o mapeamento da malha nesta região, conforme pode ser visto nas Figuras 5 e 6.

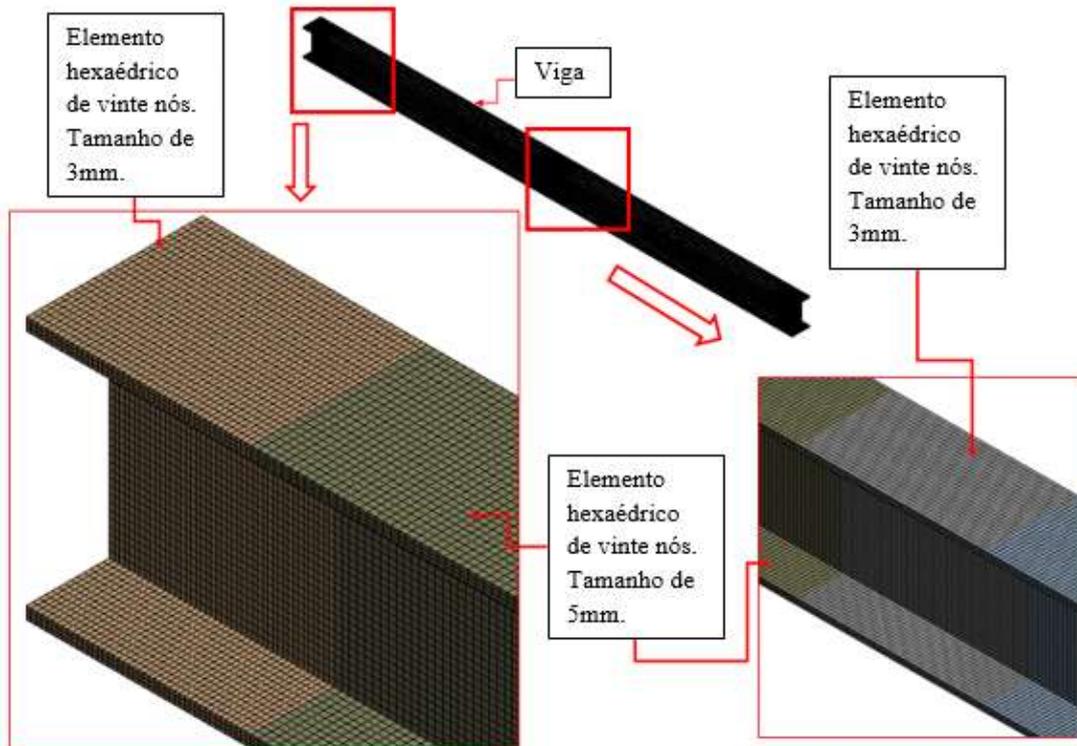


Figura 4 – Viga analisada com elemento sólido, com detalhes da discretização e refinamento da malha

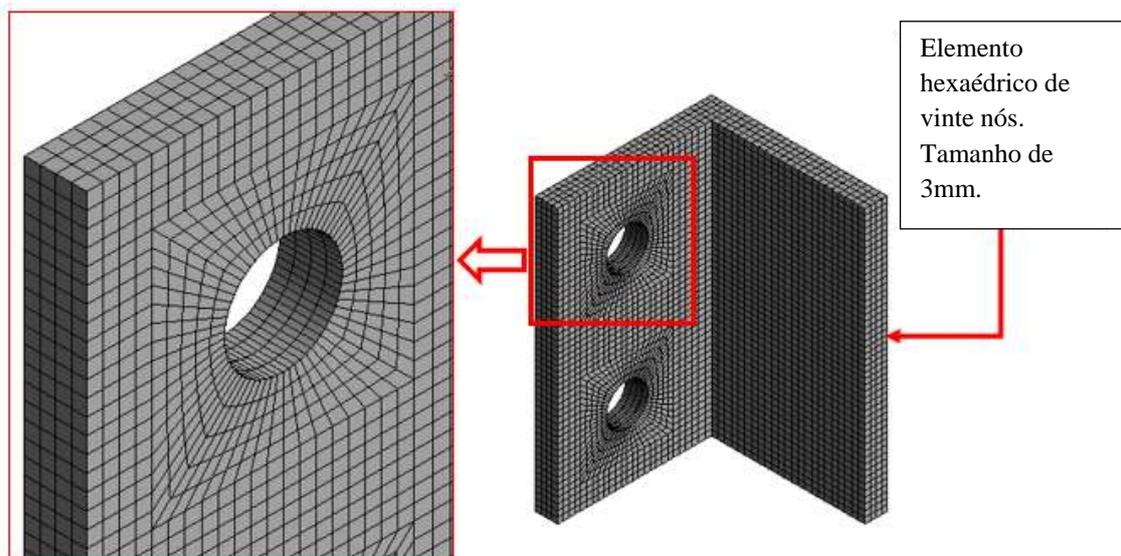


Figura 5 – Discretização e refinamento da malha da cantoneira utilizando elemento sólido

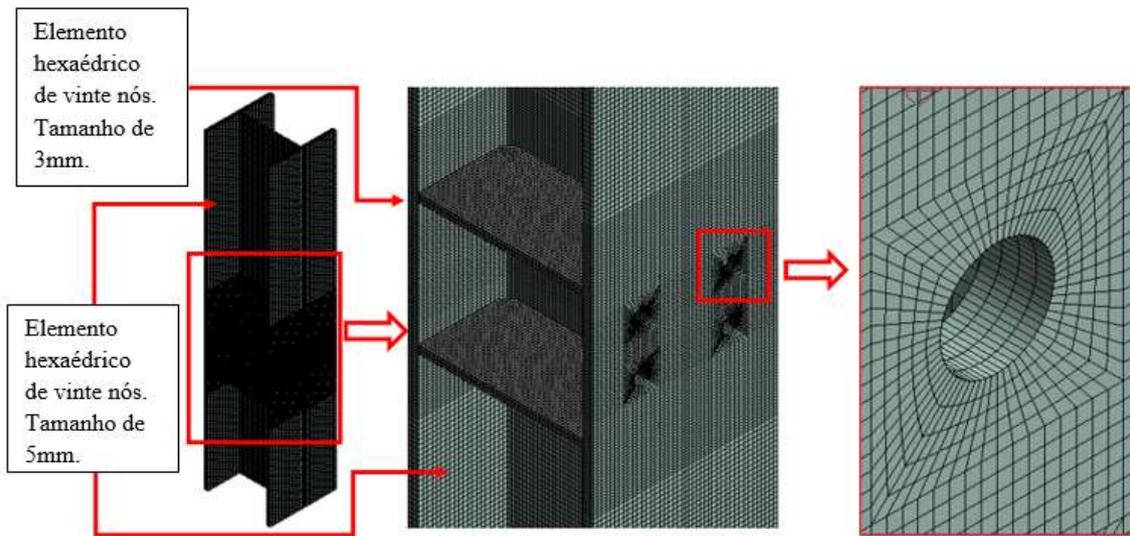


Figura 6 – Discretização e refinamento da malha da coluna utilizando elemento sólido

### 2.1.2 Discretização do conjunto utilizando elementos casca

O modelo de casca, difere-se do modelo com elementos sólidos devido à estrutura ser gerada a partir da superfície média dos corpos que constituem o modelo estrutural, de forma que as características da seção transversal são previamente definidas em *software* CAD, conforme Figuras 7 a 9.

Entretanto, embora este modelo siga os mesmos critérios de refinamento da malha, o elemento utilizado para discretização foi o quadrilateral de oito nós.

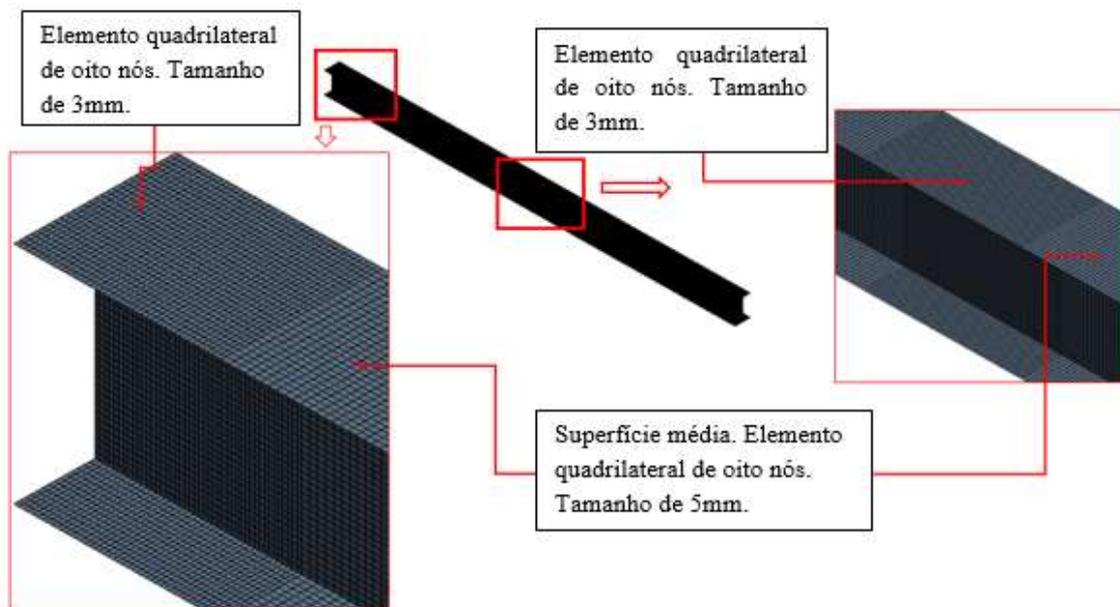


Figura 7 – Viga analisada com elemento de casca, com detalhes da discretização e refinamento da malha

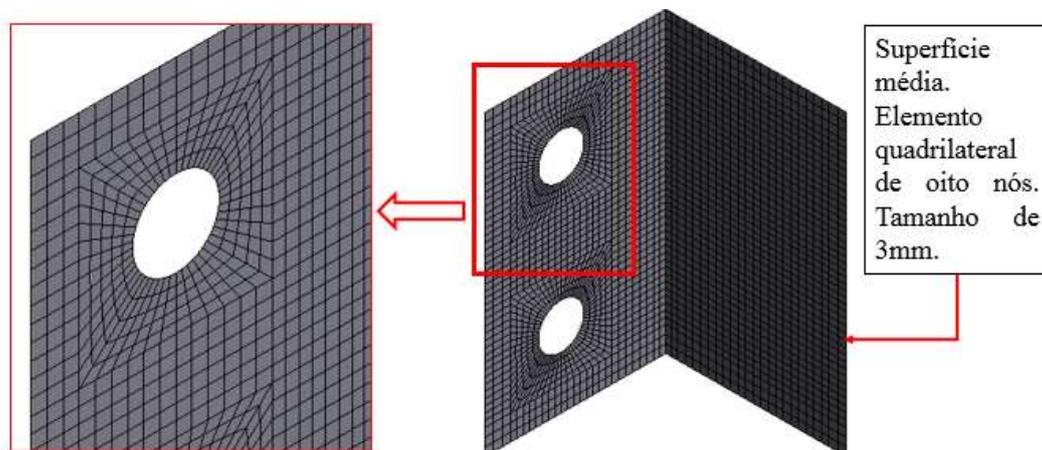


Figura 8 – Discretização e refinamento da malha da cantoneira utilizando elemento de casca

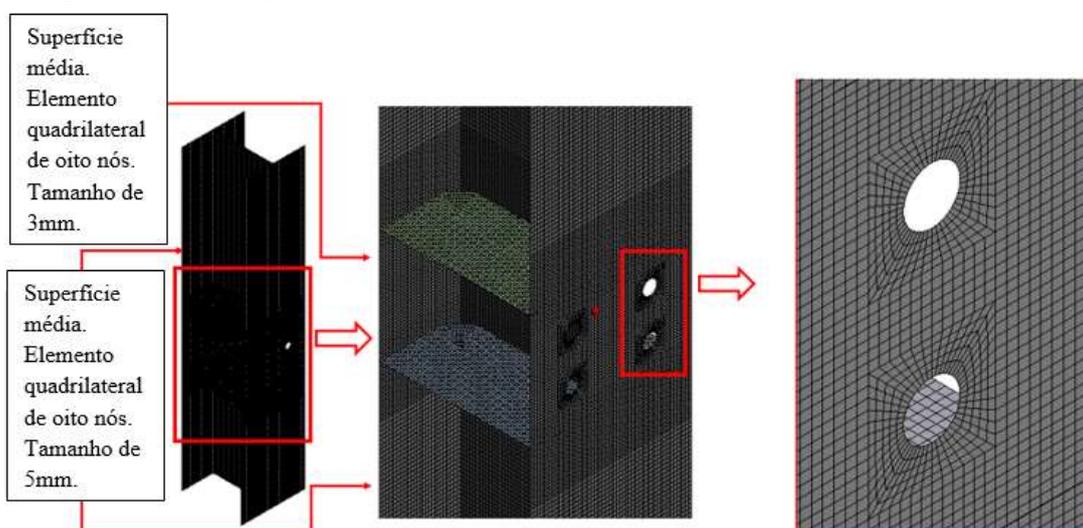


Figura 9 – Discretização e refinamento da malha da coluna utilizando elemento de casca

### 2.1.3 Discretização do conjunto utilizando elementos casca/viga (malha mista)

Devido à formulação do elemento de viga, sua aplicação deve ser usada somente em seções do modelo que não se tem interesse no valor das tensões, pois estas por serem representadas por uma linha não se tem capacidade de modelar efeitos locais, como por exemplo, flexões locais da alma ou da mesa. Sendo assim, os perfis do modelo utilizando elementos de viga, extraídos em *software CAD*, foram unificados ao modelo de casca, de modo que as regiões que abrangem as ligações foram mantidas com elementos de casca. O elemento de viga utilizado é constituído por elemento quadrático de três nós, com um nó intermediário. As Figuras 8, 10 e 11 apresentam as malhas geradas para o modelo com elementos mistos.

Quando são conectados elementos diferentes, deve-se tomar cuidado devido a possíveis diferenças entre graus de liberdades dos nós, sendo que neste caso, o elemento de casca e de viga são diretamente compatíveis, pois ambos possuem graus de liberdade de deslocamento e rotações. Cuidados adicionais devem ser tomados ao conectar elementos sólidos com casca, pois o elemento sólido não tem grau de liberdade de rotação e o elemento de casca tem rotações nodais, não sendo compatíveis.

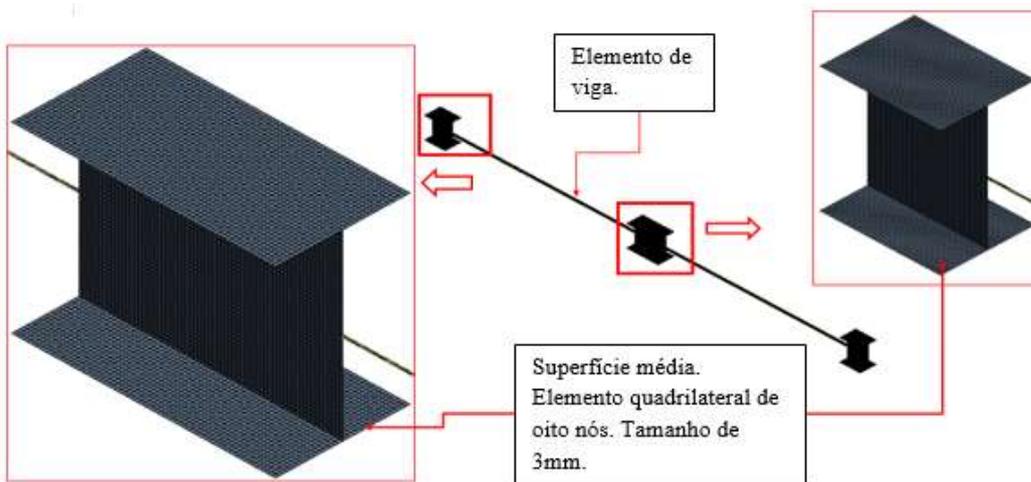


Figura 10 – Discretização e refinamento da malha da viga com elementos de *beam* e casca

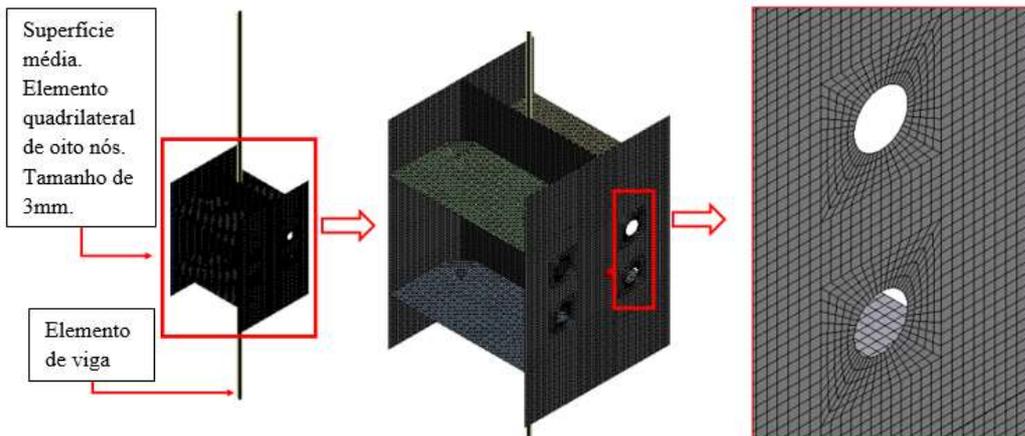


Figura 11 – Discretização e refinamento da malha da coluna utilizando elemento de casca e viga

#### 2.1.4 Discretização dos Parafusos

Para a análise numérica foi considerado, conforme Figura 12, a porca e o parafuso conectados por elementos de viga com as características da seção transversal previamente definida com seção circular conforme diâmetro nominal do parafuso. Segundo a ESSS (2015), esse tipo de consideração é possível devido à natureza do carregamento que se pretende aplicar e ao comportamento do conjunto porca/parafuso. Ainda, para melhor discretização do elemento, o conjunto foi subdividido em 36 partes gerando um mapeamento, conforme pode ser visualizado nas Figuras 12 (a) e (b).

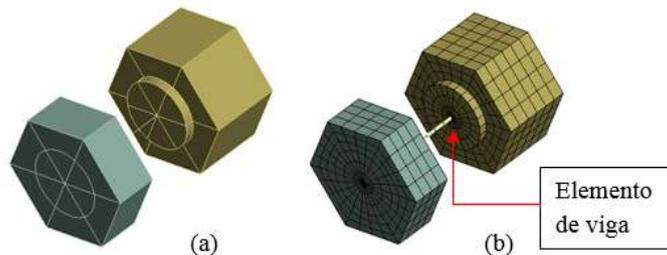


Figura 12 – Conjunto porca e parafuso

Os elementos de maior relevância do modelo foram analisados com malha refinada no tamanho de 3 mm. Sendo assim, para o conjunto de parafusos e porcas foram utilizados os mesmos critérios de discretização, empregando elementos do tipo hexaédrico de 20 nós, de modo que tal configuração é mantida em todos os modelos analisados.

Por fim, a discretização total dos modelos numéricos conforme tipologias das malhas empregadas, podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo da geração de malha conforme a tipologia do modelo

Tipo de Modelo Numérico	Número de Elementos	Número de Nós
Modelo Elemento Sólido	458011	2321012
Modelo Elemento Casca	172551	548284
Modelo Elemento Viga/Casca	97521	322404

### 2.1.5 Descontinuidades Geométricas

Com base no estudo de técnicas do estado da arte, foram determinadas as geometrias dos modelos levando-se em conta as suas respectivas não linearidades, ou seja, em consequência da tipologia construtiva, as ligações soldadas-aparafusadas apresentam descontinuidades geométricas. Isso ocorre devido ao grande número de componentes isolados a serem agrupados de modo a formar a ligação. Desta forma, para que a simulação represente o comportamento da ligação mais próxima do real possível, se faz necessário considerar tais descontinuidades.

Para isso, foram utilizados elementos de contato, os quais tem por objetivo simular as conexões entre as interfaces dos componentes que constituem o modelo. Sendo assim, devido a diversidade de elementos finitos utilizados, a representação dos contatos é apresentado em duas etapas.

Primeiramente, na Figura 13 são apresentadas as considerações quanto aos elementos de contato para o modelo com elemento sólido, onde, a utilização de contatos assimétricos, para definir preliminarmente as superfícies e alvos no modelo de ligação com dupla cantoneira, foram do tipo *frictional* com um coeficiente de atrito de 0.2, definido conforme especificação da NBR 8800 (ABNT, 2008), para a seção aparafusada (parafuso, cantoneira e coluna), assim como para a interface cantoneira/viga. Utilizou-se o contato *bonded* ou colado para as regiões soldadas da cantoneira e enrijecedores, e o contato *fixed joint* ou com elemento rígido para a união entre o corpo do parafuso (elemento de viga), cabeça do parafuso e porca, dispostos da seguinte forma:

- 1 Contato colado entre as bordas do enrijecedor e as faces da alma e mesas da coluna;
- 2 Contato colado entre as bordas da cantoneira e a face da alma da viga;
- 3 Contato com atrito de 0.2 entre a face da cabeça do parafuso e a face da cantoneira;
- 4 Contato com atrito de 0.2 entre a face da porca e a face da coluna;
- 5 Contato com atrito de 0.2 entre a face da cantoneira e a face externa da mesa da coluna
- 6 Contato com atrito de 0.2 entre a face inferior da cantoneira e a face da alma da viga;
- 7 Contato com atrito de 0.2 entre o fuste do parafuso e a parede do furo da cantoneira;
- 8 Contato com atrito de 0.2 entre o fuste do parafuso e a parede do furo da coluna;
- 9 Contato com elemento rígido entre os vértices do elemento de viga que representa o corpo do parafuso e as faces da cabeça do parafuso e da porca.

\* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

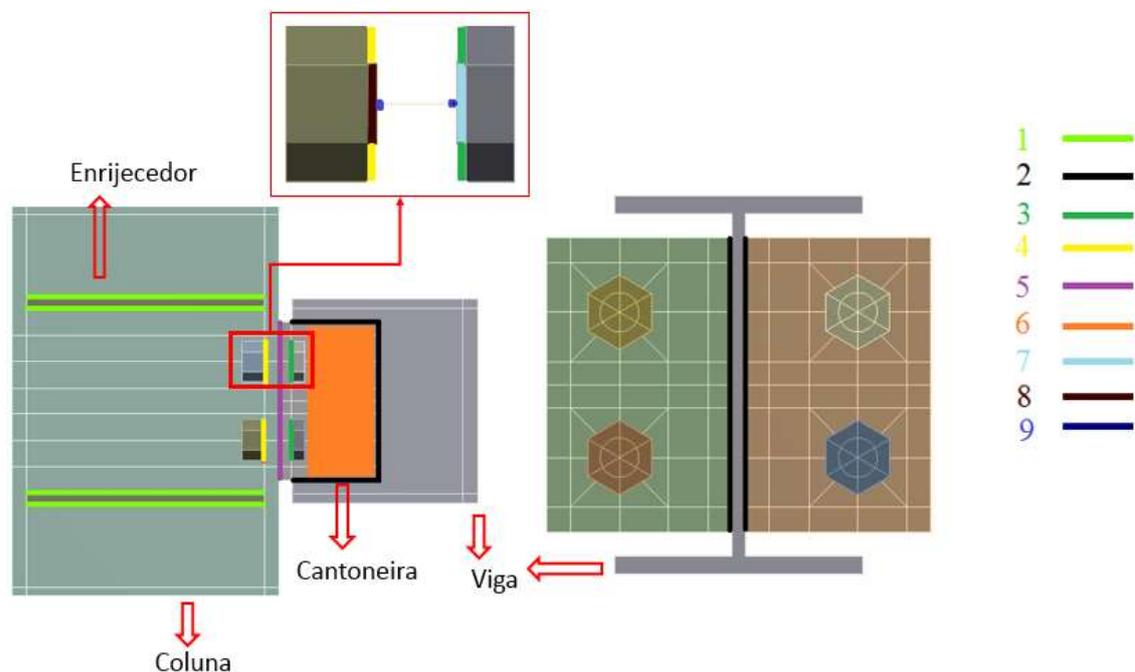


Figura 13 - Contatos da ligação com dupla cantoneira para modelo de elemento sólido

Os contatos colado e utilizando elementos rígidos foram definidos com formulação *MPC*, recomendado para contatos lineares e de geometrias distintas, de modo a permitir o acoplamento de graus de liberdade distintos e garantir uma boa precisão (ESSS, 2015).

Já para o modelo com elemento de casca, em segunda etapa, aplicaram-se contatos assimétricos para definir preliminarmente as superfícies e alvos do tipo *frictional* com um coeficiente de atrito de 0.2, conforme especificação da NBR 8800 (ABNT, 2008), entre as faces cantoneira/parafuso e parafuso/coluna, bem como na superfície inferior da cantoneira com a face da alma da viga.

Em seguida, foi aplicado o contato *bonded* ou colado para as regiões soldadas da cantoneira e enrijecedores e o contato com elementos rígidos para a união entre o corpo do parafuso (elemento de viga), cabeça do parafuso e porca, ambos com formulação *MPC* de modo a permitir o acoplamento de graus de liberdade distintos. Nas seções correspondentes ao fuste do parafuso e as furações devido ao modelo trabalhar com a superfície média e gerar um afastamento entre as faces, adotou-se um contato sem atrito ou *frictionless*. E, por fim, aplicou-se o contato *fixed joints* ou elemento rígido com a liberação de rotação em z, de modo a simular o contato entre o corpo do parafuso e a superfície média correspondente as faces das furações, conforme Figura 14.

Contudo, devido ao afastamento gerado a partir das superfícies médias dos componentes, todos os contatos foram simulados considerando o efeito real da espessura de cada componente (*thickness effect*), assim como um raio de abrangência do contato (*GAP*) devido ao afastamento das faces, dispostos da seguinte forma:

- 1 Contato colado entre as bordas do enrijecedor e as faces da alma e mesas da coluna;
- 2 Contato colado entre as bordas da cantoneira e a face da alma da viga;
- 3 Contato com atrito de 0.2 entre a face da cabeça do parafuso e a face da cantoneira;
- 4 Contato com atrito de 0.2 entre a face da porca e a face da coluna;

- 5 Contato com atrito de 0.2 entre a face da cantoneira e a face externa da mesa da coluna
- 6 Contato com atrito de 0.2 entre a face inferior da cantoneira e a face da alma da viga;
- 7 Contato sem atrito entre o fuste do parafuso e a linha do furo da cantoneira;
- 8 Contato sem atrito entre o fuste do parafuso e a linha do furo da coluna;
- 9 Contato utilizando elementos rígidos, com rotação livre em z, entre os o elemento de viga (corpo do parafuso) e as linhas da furação da cantoneira e da coluna;
- 10 Contato com elementos rígidos, entre os vértices do elemento de viga que representa o corpo do parafuso e as faces do parafuso e da porca.

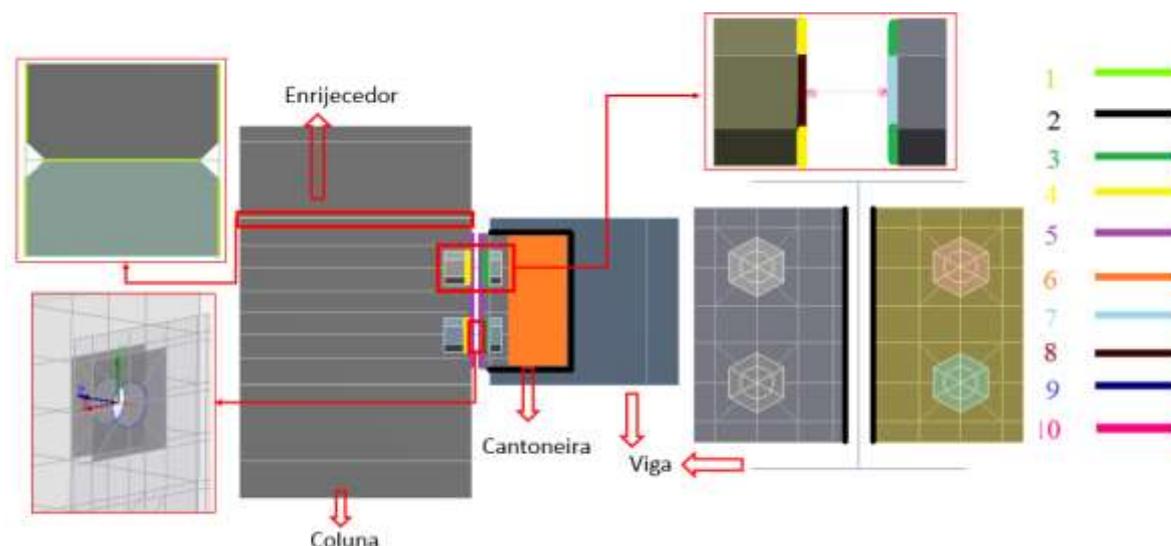


Figura 14 - Contatos para a ligação com dupla cantoneira para modelo de elemento sólido

Da mesma forma que aplicado ao modelo de casca, a configuração segue o mesmo padrão para o modelo de viga, uma vez que todos os componentes que formam a união soldada-aparafusada são os mesmos utilizados no modelo de casca. Salienta-se que o contato com elemento rígido ou *fixed joint* é aplicado a todas as superfícies médias em contato com elementos de viga.

Devido à deformação da ligação ser pequena, optou-se por trabalhar em regime de pequenos deslocamentos, de forma que o maior valor do deslocamento entre os apoios não ultrapassa a razão  $L/250$ , sendo  $L$  o comprimento do vão entre apoios expresso em centímetros e, portanto, quando obedecida esta relação a equação diferencial originalmente não linear pode ser tratada como linear.

Após a discretização e refinamento da malha de todos os componentes, assim como a definição e aplicação de todos os contatos responsáveis pelas conexões, podem ser definidas as condições de contorno referentes às cargas e restrições.

### 2.1.6 Definições das Condições de Contorno

Os resultados finais são baseados na aplicação de dois carregamentos. Primeiro, de modo a verificar o efeito dos esforços sobre os elementos estruturais oriundos da inserção de flexibilidade nas ligações, o pórtico modelado é submetido a um carregamento no valor de 41.12 kN, correspondente à resistência do perfil quanto ao seu limite de escoamento, considerando tanto parâmetros de flambagem quanto coeficientes de segurança normatizados

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), conforme o Anexo A. A carga é aplicada na região central da viga distribuída em um comprimento de 200 mm, como observado na Figura 15, de modo a determinar o limite do comportamento elástico da viga e possibilitar a leitura de dados de deformação e tensão do modelo de ligação com dupla cantoneira soldada-aparafusada, por meio de uma análise linear estática em *software* de elementos finitos.

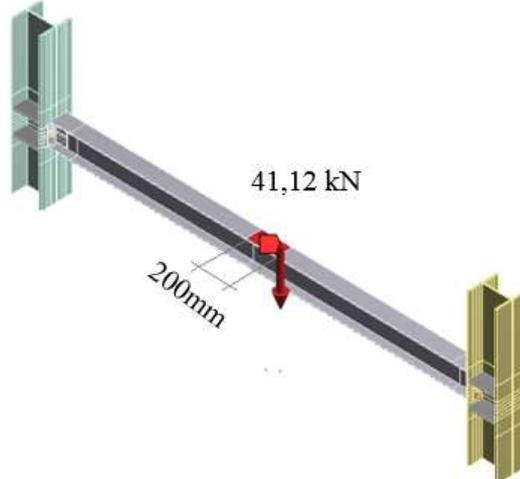


Figura 15 – Carregamento da viga

Já o segundo carregamento, em vista de que os parafusos são de alta resistência, estes devem ser apertados de forma a se obter uma protensão ( $F_t$ ) adequada a cada diâmetro e modelo de parafuso utilizado, de modo que as superfícies de contato dos perfis fiquem firmemente pressionadas umas contra as outras.

A força de protensão equivale a aproximadamente 70% da força de tração resistente nominal do parafuso (BERGAMASCO, 2012). A protensão leva ao surgimento de pressão de contato entre a cantoneira e a mesa da coluna, de modo a unir os componentes, e conseqüentemente, produzir forças de atrito entre as peças. Desta forma, para o modelo em estudo é determinada a aplicação de 100% da protensão nos parafusos no valor de 85kN, conforme Tabela 15 da ABNT NBR8800:2008, constatado na Figura 16.

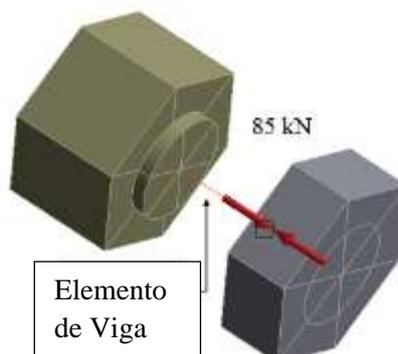


Figura 16 – Força de protensão nos parafusos

As condições de contorno são aplicadas nas ligações analisadas em todos os nós localizados nas extremidades inferior e superior da coluna de modo a restringi-los, como pode ser observado na Figura 17. Condições de rotação e translação zero são admitidas nas direções

x, y e z. Desta forma, segundo Bergamasco (2012), tais restrições impedem o deslocamento de corpo rígido e garantem a não singularidade da matriz de rigidez.

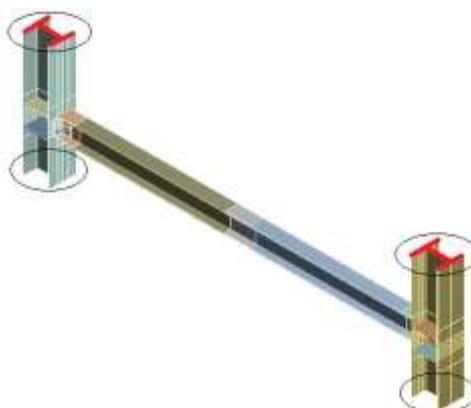


Figura 17 – Restrição das faces superiores e inferiores do modelo em estudo

As condições de contorno dependem fortemente do nível de aproximação que é buscado no modelo em relação ao fenômeno real como, por exemplo, os contatos e cargas aplicados ao modelo. Portanto, a partir da definição das condições de contorno para cada tipologia do modelo, é realizada a análise linear estática, conforme Método de Elementos Finitos, para obtenção de resultados quanto aos deslocamentos, tensões, momento fletor e rigidez da conexão, assim como a avaliação da utilização de elementos finitos sólidos, de casca e de viga.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a influência do tipo de elemento, os resultados da simulação com elementos de casca, viga e elementos sólidos foram comparados através dos deslocamentos e tensões produzidas na região inferior do perfil da viga, no sentido da aplicação da carga, no modelo de ligação com dupla cantoneira soldada-aparafusada entre viga e coluna.

Desta forma, utilizando um modelo com elementos sólidos, obteve-se um deslocamento de 7.31 mm, como observado na Figura 18. Na Figura 19, é possível verificar a tensão produzida no modelo estrutural no valor de 170.05 MPa.

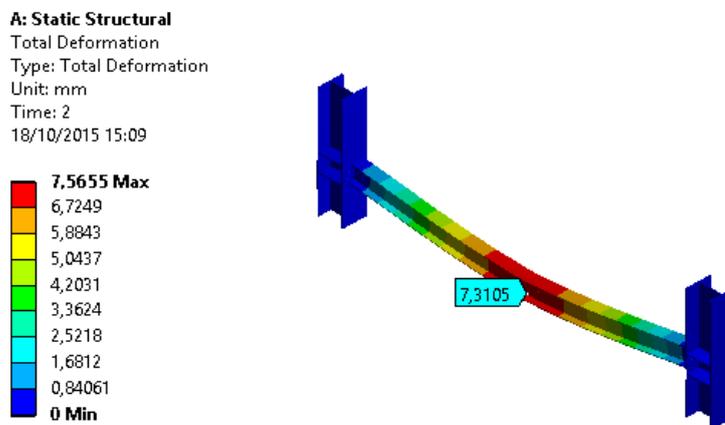


Figura 18 – Deslocamento máximo da seção inferior da viga do modelo de elemento sólido

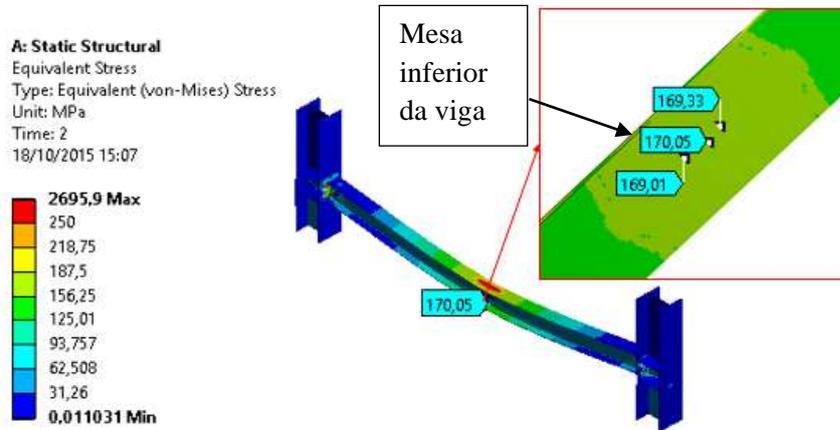


Figura 19 – Distribuição de tensão de von-Mises para o modelo de elemento sólido

No modelo de casca verificou-se um deslocamento no valor de 7.638 mm, apresentado na Figura 20, e uma tensão de 184.72 MPa, conforme Figura 21.

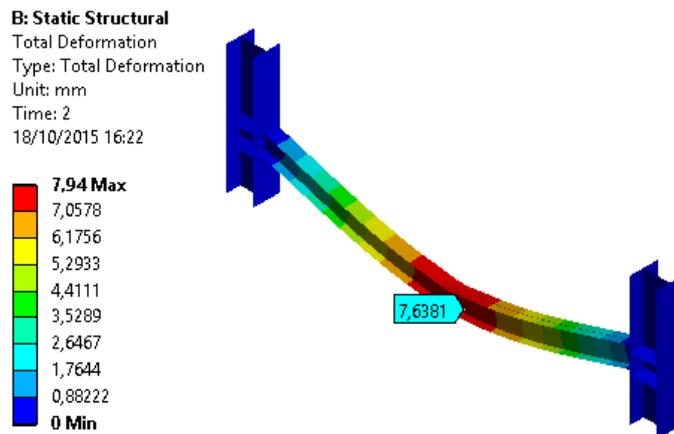


Figura 20 – Deslocamento máximo da seção inferior da viga do modelo de elemento de casca

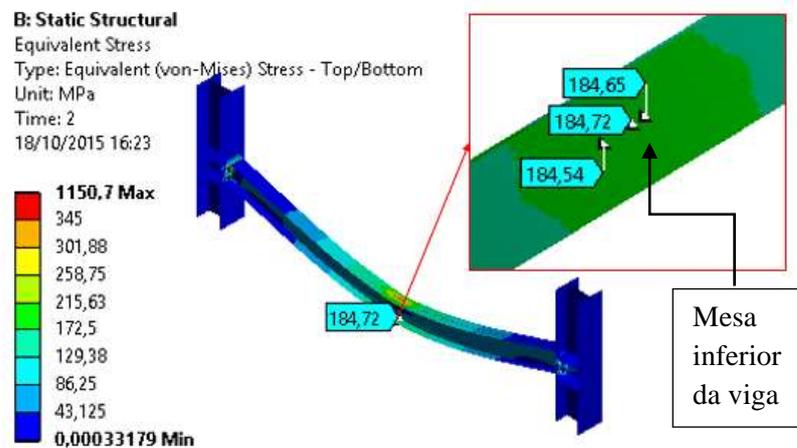


Figura 21 – Distribuição das tensões equivalentes de Von-Mises para o modelo de elemento de casca

Já o terceiro modelo, os componentes que constituem a ligação foram mantidos com elementos de casca e as demais seções extraídas para elemento de viga. Desta forma, o modelo obteve um deslocamento no valor de 7.633 mm, conforme Figura 22, e uma tensão de valor 184.61 MPa, observada na Figura 23.

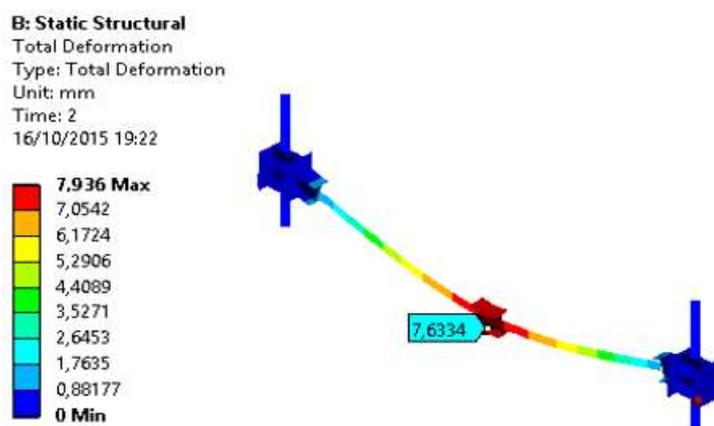


Figura 22 – Deslocamento máximo da viga do modelo misto com elementos de viga e casca

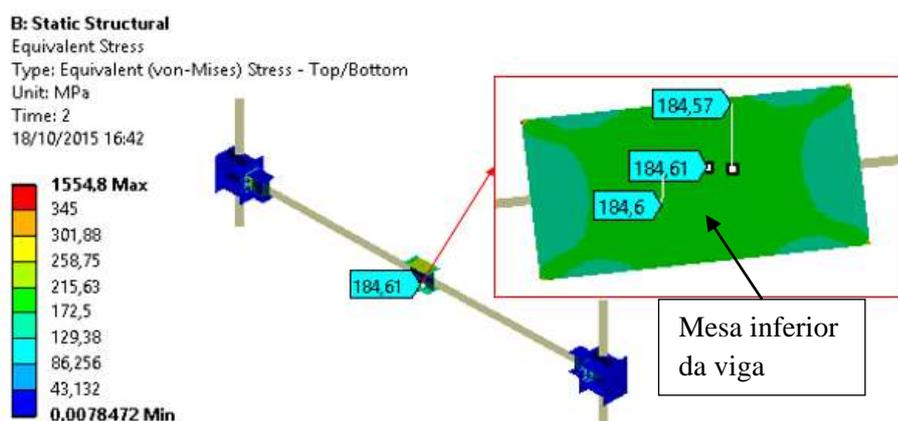


Figura 23 – Distribuição de tensão de von-Mises para o modelo misto com elementos de viga e casca

Com base na Tabela 4, podem ser visualizados os resultados das simulações conforme tipologia da análise. O modelo com elemento de casca apresenta uma diferença percentual de deslocamento e tensão de 4.48% e 8.62%, respectivamente, e o modelo utilizando elementos de casca e viga consiste em um deslocamento e tensão 4.41% e 8.56%, respectivamente maior, quando comparados ao modelo utilizando elemento sólido.

Tabela 4 – Comparação de resultados conforme tipologia do modelo

Modelo	Deslocamento Máximo (mm)	Tensão (MPa)	Tempo de processamento (horas)	Diferença de deslocamento em relação ao modelo sólido	Diferença de tensões em relação ao modelo sólido
Elemento sólido	7,31	170,05	51,94	-	-
Elemento de casca	7,638	184,72	1,25	4,48%	8,62%
Elemento de viga e casca	7,633	184,61	0,83	4,41%	8,56%

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

De acordo com a Tabela 4, usa-se um tempo de processamento de aproximadamente 41 vezes menor para a análise utilizando elemento de casca, e em torno de 62 vezes menor para o modelo utilizando elementos de viga e casca, quando comparados ao modelo utilizando elemento sólido.

#### 4. CONCLUSÃO

Ao verificar a análise do modelo em estudo, através da aplicação de três diferentes tipos de elementos finitos, observou-se nos resultados das deformações e tensões que o modelo sólido foi o mais preciso. Contudo essa característica esteve associada a um elevado custo computacional. A boa aproximação do resultado se dá pelo fato do elemento sólido simular um objeto tridimensional como o perfil realmente é, de modo a representar as deformações transversais da chapa, ou seja, mostram os fenômenos de tensões e deformações através da espessura. A malha utilizada foi escolhida com a mesma configuração de tamanho de elemento para todos os casos. Porém, como o modelo sólido representa melhor a espessura do componente, a malha é constituída de elementos tridimensionais e, portanto, configura um alto número de elementos e nós, de modo que o tamanho das matrizes de rigidez e o custo computacional ficaram maiores.

O modelo com elementos de casca apresentou 4.48% de diferença entre as deformações e 8.62% de diferença entre as tensões, quando comparado ao modelo com elemento sólido. O tempo necessário de processamento para este modelo foi, aproximadamente, 41 vezes menor, embora com uma diferença de resultados, quando comparado ao modelo em sólido. Isso ocorre devido à diferença na discretização destes modelos, uma vez que a espessura não é modelada. Em vista disso, geram-se *GAP's*, ou seja, criam-se folgas entre as faces dos componentes, de modo que o ajuste de interface pode influenciar na rigidez do modelo. Portanto, as simplificações impostas induzem a ocorrência de algumas singularidades numéricas em modelos de casca. Esta condição é recorrente neste tipo de formulação de elemento. Entretanto, os elementos de casca são bastante utilizados e apresentam bons resultados quando se tem ligações entre chapas soldadas ou aparafusada em geometrias complexas.

Já o modelo com elementos de viga, apresentou dados de tensão e deformação similares ao modelo com elementos de casca. Isso se deve, ao fato de que os componentes que formam a ligação dos dois modelos serem compostos pela mesma configuração. De modo que, os dados de deslocamento e tensão apresentaram uma diferença percentual de 4.41% e 8.56%, respectivamente, quando comparado ao modelo sólido, aliado a um tempo de processamento de, aproximadamente, 62 vezes menor. Desta forma, o elemento de viga pode ser utilizado para análise de perfis conhecidos e com propriedades geométricas definidas. O sucesso deste elemento para esse caso é devido a sua própria formulação matemática no programa, que utiliza as equações de rigidez de perfis estruturais apoiado nas propriedades da seção transversal a que é atribuída.

Em resumo, a principal desvantagem da utilização de elementos sólidos, se comparado ao elemento de casca e viga, é o tempo de processamento da simulação. Assim, para análise de ligações é recomendável utilizar programas computacionais que utilizem elementos de casca ou viga na simulação, pois são rápidos e eficientes.

---

\* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

## REFERÊNCIAS

ANSYS. **User's Manual**. In: ANSYS Workbench v.15.0 - User's Manual. ANSYS, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 237 p.

BERGAMASCO, Pedro Diego Almeida. **Estudo do Comportamento de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida: Análise Numérica**. 2012. 396 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ENGINEERING SIMULATION SCIENTIFIC SOFTWARE (ESSS). **Análise de Ligações Parafusadas no ANSYS Mechanical**. Disponível em: <[http://www.esss.com.br/pdf/conteudo/ebook\\_analises\\_ligacoes\\_parafusadas\\_ok.pdf](http://www.esss.com.br/pdf/conteudo/ebook_analises_ligacoes_parafusadas_ok.pdf)>. Acesso em: 31 outubro 2015.

GERDAU, Aço Minas. **Tabela de Bitolas**. Disponível em: <<http://www.soufer.com.br/arquivos/laminados/2.pdf>>. Acesso em: 02 novembro 2015.