



## ANÁLISE NUMÉRICA DA LIGAÇÃO COM DIAFRAGMA EXTERNO ENTRE VIGA I E PILAR TUBULAR CIRCULAR

**Felipe Botelho Coutinho**

**Macksuel Soares de Azevedo**

felipecoutinho@msn.com

Macksuel.azevedo@gmail.com

**Walnório Graça Ferreira**

walnorio@gmail.com

**Élcio Cassimiro Alves**

elcio.calves1@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus Goiabeiras, CEP 29.097-910, Vitória, Espírito Santo, Brasil

**Resumo.** A utilização de diafragma externo na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular tem por objetivo o aumento na eficácia da transferência dos esforços entre esses elementos. Seu estudo teve início na década de 1970, no Japão, onde foram feitas análises teóricas e experimentais da sua aplicação. No Brasil, as pesquisas são recentes e iniciaram em 2005 com Carvalho (2005), que realizou as primeiras análises numéricas com e sem o uso de diafragma externo. A norma brasileira para estruturas tubulares em aço, ABNT NBR 16239:2013, não trata especificamente desse assunto, sendo necessária a utilização de pesquisas nacionais e internacionais para embasamento teórico. O objetivo deste trabalho é analisar numericamente o comportamento do diafragma externo, com diferentes dimensões, na ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular.

**Palavras-chave:** diafragma externo, ligação viga-pilar, estrutura tubular, estrutura de aço.

## 1 INTRODUÇÃO

As ligações desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas tubulares em aço, com diversos trabalhos de pesquisa desenvolvidos com o objetivo de entender o seu comportamento real. Para ligação com diafragma externo, no entanto, a maioria das normas técnicas e comitês internacionais não abordam o seu dimensionamento, deixando sobre o projetista a responsabilidade de avaliar os parâmetros de rigidez e resistência. As incertezas do seu comportamento podem levar a uma avaliação incorreta ou, na maioria das vezes, a utilização de uma concepção estrutural alternativa à estrutura tubular.

No Brasil, apesar do crescimento do uso das estruturas tubulares, ainda são poucas as pesquisas sobre o comportamento das ligações com diafragma externo. A recém-lançada norma brasileira que aborda ligações tubulares em aço, ABNT NBR 16239:2013 e as principais normas internacionais, americana AISC 360-10 e europeia EN 1993-1-8:2005, não fazem referência sobre a sua utilização e o seu dimensionamento. Apesar disso, o CIDECT (Comité International Pour Le Développement Et L'étude De La Construction Tubulaire) por meio do seu nono manual escrito por Kurobane (2004), Design Guide 9: For structural hollow section column connections, apresenta um procedimento de cálculo próprio para o dimensionamento de ligações com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular, circular ou quadrado.

O objetivo deste trabalho é o estudo numérico do comportamento da ligação com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular. Na Figura 1, aplicação de diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular.



**Figura 1. Diafragma externo, aeroporto de Auckland, Nova Zelândia (Disponível em: <[www.atlastube.com](http://www.atlastube.com)>. Acesso em: 17 out. 2013.)**

## 2 ANÁLISE NUMÉRICA

O principal objetivo da análise numérica em elementos finitos é expandir para diferentes geometrias o conhecimento de um dado comportamento estrutural, o que possibilita a redução substancial de tempo e custo da solução quando comparados com ensaios de laboratórios convencionais.

Para essa análise foi utilizado um modelo tridimensional, utilizando o programa de computador de elementos finitos, ANSYS (2013), concebido de forma a representar o máximo possível a situação real da estrutura. Inicialmente, para validação do modelo numérico, será adotada ligação entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular sem

diafragma externo, conforme experimento TCR-W de Masioli (2011). Posteriormente, será acrescido o diafragma externo, com variação das suas dimensões para análise da sua influência no comportamento da ligação.

### 2.1 Experimento de Masioli (2011)

O experimento de referência para análise numérica deste trabalho foi realizado por Masioli (2011), onde será utilizado apenas o segundo ensaio da sua pesquisa, o modelo TCR-W. A ligação adotada foi do tipo T entre a viga de seção I e o pilar tubular de seção circular, como mostra a Figura 2. A ligação utilizada no diafragma externo foi soldada, o que contribuiu de forma positiva na análise numérica. Se tivessem sido utilizados experimentos com ligações parafusadas, ocorreriam pontos de perturbação de concentração de tensões na região dos parafusos não apresentando patamar de escoamento bem definido, conforme consta em Sabbagh (2013) e Masioli (2011).

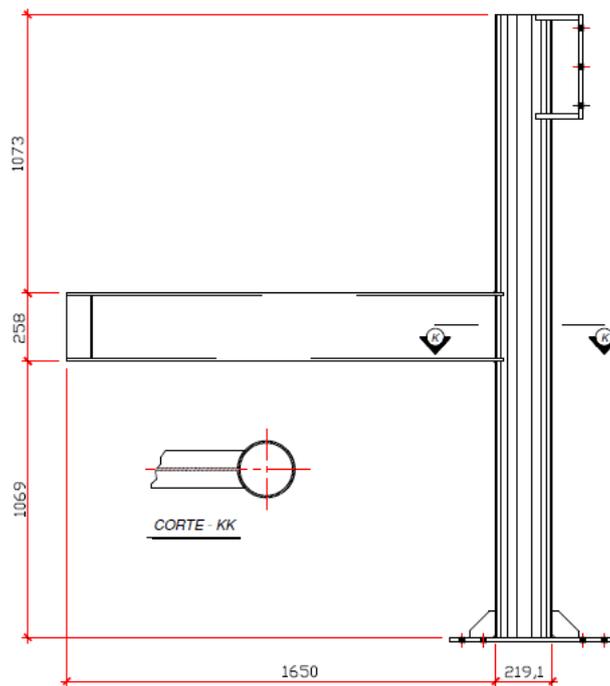


Figura 2. Geometria do experimento (Masioli, 2011)

**Propriedades geométricas.** Foram considerados perfis comerciais para o pilar tubular e perfil soldado para a viga de seção I. Na Tabela 1 e na Tabela 2 são apresentadas as propriedades geométricas das vigas e dos pilares respectivamente.

Tabela 1. Propriedades geométricas da viga de seção I

Perfil	Massa linear (kg/m)	Área (cm <sup>2</sup> )	d (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	h (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	b <sub>f</sub> (mm)	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )
258x32	32,34	41,2	258	6,1	239,8	9,1	146	4818	374

Tabela 2. Propriedades geométricas do pilar tubular de seção circular

Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa Linear (kg/m)	Área (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )
219,1	8,2	42,5	54,2	3020	276

**Propriedades dos materiais.** O aço dos perfis é o ASTM A36 e as propriedades mecânicas foram obtidas por meio de ensaio de tração e a caracterização realizada em máquina de ensaio universal, com a utilização de três corpos de prova para cada elemento, viga e pilar. A Tabela 3 mostra os resultados da caracterização do aço dos perfis. Onde, o módulo de elasticidade (E) é igual a 205000 MPa e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é 0,3.

Tabela 3: Resistências médias correspondentes dos elementos de aço

Elemento	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
Viga	400,0	513,0
Pilar	330,0	473,0
Diafragma externo	385,0	468,0

**Condições de contorno e carregamento.** As condições de contorno são apresentadas na Figura 3, com restrição ao deslocamento e a rotação nas extremidades inferior e superior ao pilar. Aplicou-se uma força na extremidade da viga por meio de atuador hidráulico com capacidade de carga de 300 kN.

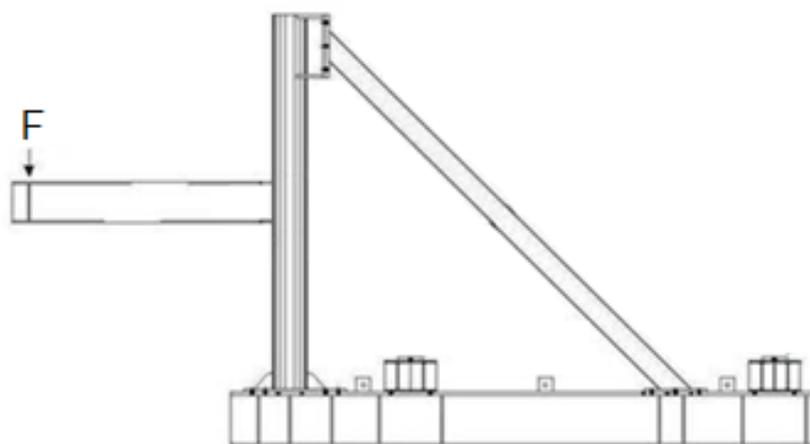


Figura 3. Modelo experimental (Masioli, 2011)

Além disso, por meio dos registros fotográficos de Masioli (2011), constatou-se na região da metade da viga restrição ao deslocamento devido às contenções laterais, conforme Figura 4. Também houve impedimento ao deslocamento fora do plano no ponto de aplicação da

carga na viga, na altura do enrijecedor, em virtude do atuador hidráulico, o qual era fixo em sua base.



Figura 4. Travamento lateral das mesas da viga

**Resultados experimentais.** Na Figura 5, tem-se o gráfico do deslocamento na extremidade da viga, especificamente no enrijecedor vertical conforme aplicação da força. Além disso, pela carga considerada, verifica-se pequena influência do peso próprio da viga, menos que 1%, se considerar a pior hipótese, o peso total na extremidade que está sendo aplicado o carregamento. Portanto os efeitos da gravidade foram desconsiderados nessa análise.

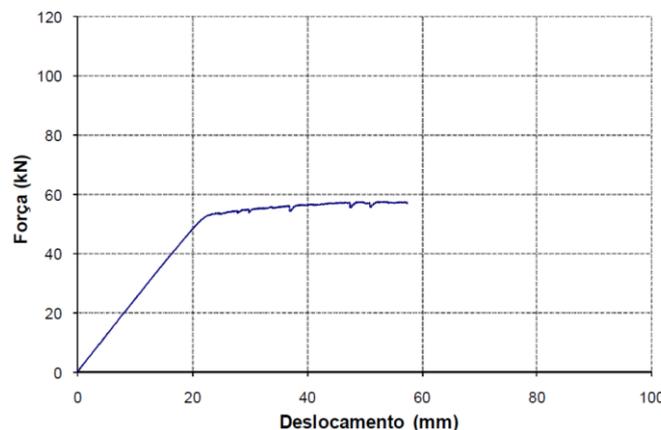


Figura 5. Comportamento força *versus* deslocamento (Masioli, 2011)

## 2.2 Descrição numérica

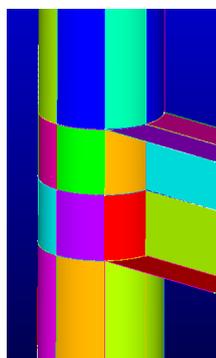
**Análise numérica.** A análise linear ainda é o método mais usado na prática para engenharia, conforme Vellasco (2014), e considera o deslocamento proporcional à força aplicada com magnitude reduzida, o que faz com que os efeitos de segunda ordem, devido à mudança na geometria da estrutura, sejam desprezados.

Na análise numérica do modelo TCR-W, Freitas (2009), Masioli (2011) e Pereira (2013) adotaram nas suas pesquisas o regime de grandes deslocamentos. O programa ANSYS (2013) recomenda essa análise quando há possibilidade de flambagem e consequentemente grandes deformações à estrutura, mesma consideração apresentada por Ferreira (2008). Segundo

Masioli (2011), o experimento TCR-W apresentou falha devido à flambagem da parede do pilar na região da ligação com a viga, o que justifica o uso da teoria de grandes deslocamentos.

Para a análise não linear será adotado o método Newton-Raphson completo, o qual leva em consideração os efeitos não lineares do comportamento dos elementos e consiste em pequenos incrementos de carga de forma gradual gerando pequenos deslocamentos que alteram a estrutura do modelo e ocasionam outros esforços. O colapso é obtido pela não convergência da solução numérica, o que geralmente ocorre em estados avançados de carregamento. Para o critério de falha, será utilizado o da energia de distorção máxima ou critério de von Mises.

**Características geométricas do modelo e tipo de elemento finito.** A geometria será a mesma utilizada por Masioli (2011) no experimento TCR-W, conforme Figura 2. O elemento referente à solda não será considerado no modelo numérico, seguindo mesmo procedimento de Masioli (2011). Para a sua configuração, serão feitas divisões nas áreas, conforme Figura 6, com o intuito de forçar a interação entre os pontos e linhas de interseção da viga com o pilar.



**Figura 6. Divisão das áreas do modelo numérico, TCR-W**

Ao analisar a viga, verifica-se que é composta de um agrupamento de placas correspondente as mesas e a alma. De forma análoga, o pilar corresponde à geometria de casca, devido a sua seção oca e espessura de parede fina. Portanto, para a simulação numérica deste trabalho será utilizado um elemento que represente da forma mais próxima possível o comportamento desses dois tipos de estruturas.

O elemento a ser adotado é o Shell181, da biblioteca do ANSYS (2013), governado pela teoria de Mindlin-Reissner, derivado da análise de estruturas de placa fina e moderadamente espessa, condição para as formas que compõem a viga e o pilar deste trabalho, sendo adequado para aplicações com grandes rotações e grandes deformações não lineares. O elemento possui 8 nós (i, j, k, l, m, n, o e p) com 6 graus de liberdade em cada. Sendo translações nas direções x, y e z e rotações em relação aos eixos x, y e z conforme mostrado na Figura 7.

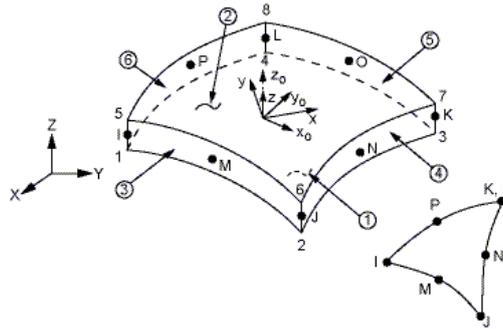


Figura 7. Elemento Shell181

**Consideração das imperfeições geométricas iniciais.** Para análise global das estruturas em aço, o EN 1993-1-1:2005 estabelece a consideração dos efeitos de imperfeição geométrica inicial nos casos de modificação significativa da estrutura quando submetida a carregamento. Para isso, orienta a adoção da estrutura deformada na condição inicial, através de análise de flambagem da estrutura, considerando direção e forma mais desfavorável, sendo para as características da viga deste trabalho, o ponto com maior deslocamento corresponde a  $L/250$ , onde  $L$  é o comprimento da viga. Mesma consideração foi apresentada por Vellasco (2014) em situação numérica similar.

Para a definição da imperfeição geométrica inicial, será utilizado artifício da superposição de análise de flambagem, que envolve duas análises com os dados de um mesmo modelo. Primeiramente faz-se a análise de flambagem sobre o modelo perfeito, de maneira a estabelecer prováveis modos de colapsos, que correspondem a diversas formas de imperfeições geométricas. Em seguida, determina-se a estrutura deformada na situação de maior compatibilidade com a estrutura real, que é condicionada uma amplitude para esta deformação.

**Propriedades físicas dos materiais.** Serão atribuídos à viga e ao pilar propriedades mecânicas obtidas por Masioli (2011) em ensaios de caracterização, conforme Tabela 3. Para o comportamento tensão e deformação, serão adotados diagramas multilíneares para caracterização da resistência dos aços utilizados segundo critério sugerido por Maggi (2004), de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Pontos de tensão-deformação

Ponto	$\delta$	$\epsilon$
1	$f_y$	$\epsilon_y$
2	$f_y$	$9\epsilon_y$
3	$f_y + 0,5(f_u - f_y)$	$22\epsilon_y$
4	$f_u$	$60\epsilon_y$

**Discretização da malha de elementos finitos.** A estrutura foi discretizada a ponto de se obter a melhor relação entre os resultados com o mínimo de esforço computacional. Masioli (2011), na análise numérica do seu trabalho, faz a consideração de dois tipos de malhas para o modelo

correspondente ao TCR-W, uma mais refinada, compreendendo a região da ligação a ser estudada, e outra menos refinada na região mais distante da ligação. O mesmo critério de discretização de malha foi adotado neste trabalho.

Para a escolha da dimensão ideal do elemento, será feito estudo de convergência a partir da dimensão igual a 200 mm, decrescendo o valor para um intervalo de 5 mm, adotando a dimensão na qual a variação do seu tamanho não contribua na diferença dos resultados da força máxima aplicada na extremidade da viga superior a 1%. O objetivo é a escolha do tamanho dos elementos que melhor atenda a relação do número de elementos pela variação do resultado de convergência do modelo pelo menor número de elementos.

**Condições de contorno e carregamento.** Assim como na análise experimental, as extremidades inferior e superior do pilar serão impedidas de transladar e rotacionar em qualquer uma das três direções ortogonais. Além disso, serão feitas restrições para deslocamento fora do plano na metade da viga, especificamente nas extremidades das mesas, e no ponto de aplicação da carga, na região do enrijecedor vertical. A força será aplicada na extremidade da viga, conforme Figura 3.

### 2.3 Consideração do diafragma externo

Após validação do modelo numérico, será acrescentado o diafragma externo na ligação conforme a geometria apresentada por Kurobane (2004).

**Característica geométrica.** A Figura 8 mostra a geometria do diafragma externo na ligação feita por meio de relações geométricas entre a seção circular do pilar e a seção plana da mesa da viga, com o uso dos limites mínimos dos ângulos. O diafragma externo será concordante às linhas das mesas da viga, o que proporciona melhor distribuição das tensões na face do pilar. A alma da viga será conectada diretamente ao pilar.

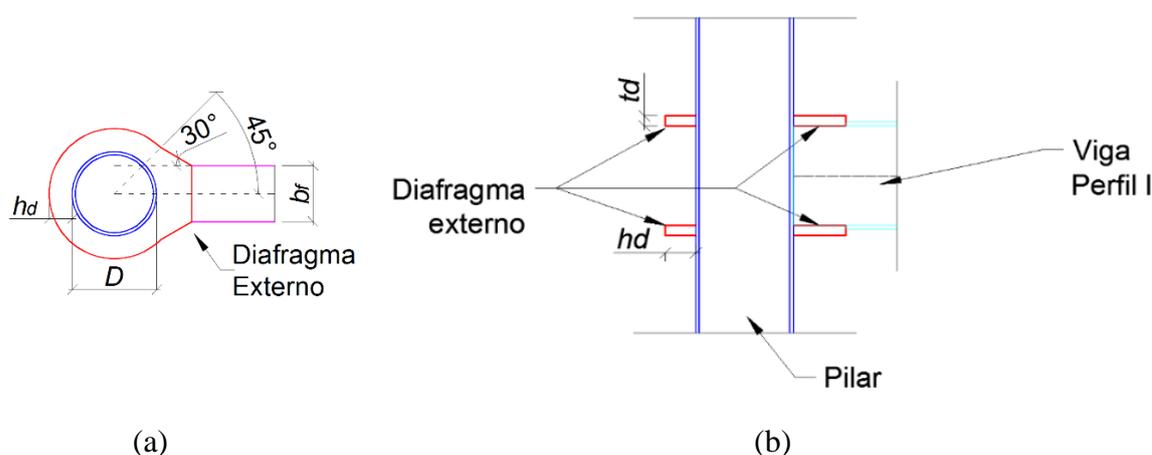


Figura 8. Geometria e disposição do diafragma externo na ligação e seção do pilar, (a) vista superior e (b) corte

**Intervalo de validade.** Serão feitos estudos dos limites geométricos conforme Kurobane(2004) e será adotada a sigla VC para cada análise, em referência à verificação do CIDECT. Juntamente com esse estudo, será apresentada análise do intervalo de dados para investigação das diferentes larguras e espessuras do diafragma externo.

**VC-1:** Refere-se exclusivamente ao pilar e corresponde a relação do seu diâmetro,  $d_0$ , com sua espessura,  $t_0$ , conforme Equação (1):

$$14 \leq \frac{d_0}{t_0} \leq 36 \quad (1)$$

Sendo,  $d_0=219,1$  mm e  $t_0=8,2$  mm, tem-se  $\frac{d_0}{t_0} = 26,71$ , o qual atende ao intervalo de validade.

**VC-2:** Verifica a relação da largura do diafragma externo,  $h_d$ , com o diâmetro do pilar,  $d_0$ , segundo a Equação (2).

$$0,05 \leq \frac{h_d}{d_0} \leq 0,14 \quad (2)$$

Conhecido o valor do diâmetro do pilar, tem-se o intervalo possível da variação da altura do diafragma externo,  $h_d$ , como apresentado na Equação (3):

$$10,95 \leq h_d \leq 30,67 \quad (3)$$

Para as dimensões, será adotada a largura mínima de 10 mm, valor abaixo do limite do CIDECT e razoável para execução ‘em campo’. Será estudada até a largura de 70 mm, dezena abaixo da largura de metade da mesa da viga, com intervalo de 5 mm, considerado representativo para análise.

**VC-3:** Nessa terceira verificação, será avaliada a relação entre a espessura da parede do pilar,  $t_0$ , com a espessura do diafragma,  $t_d$ , conforme Equação (4).

$$0,75 \leq \frac{t_d}{t_0} \leq 2,0 \quad (4)$$

Da mesma forma, conhecido a espessura do pilar  $t_0$ , tem-se na Equação (5) o intervalo de validade para a espessura do diafragma,  $t_d$ :

$$6,15 \leq t_d \leq 16,4 \quad (5)$$

As dimensões a serem consideradas serão a partir de 6 mm, também ligeiramente abaixo do valor do CIDECT e no limite da sua execução ‘em campo’, com variação de 2 mm até o máximo de 20 mm, referente ao dobro da espessura da mesa da viga, 18,2 mm.

**Dimensões adotadas.** Na Tabela 5 são apresentadas as diferentes geometrias, seguindo o disposto em VC-2 e VC-3.

**Tabela 5. Dimensões adotadas para o diafragma externo. (a) nos limites estabelecidos pelo CIDECT e (b) fora desses limites.**

Espessura - $t_d$ (mm)			Largura - $h_d$ (mm)			Total de modelos
b	a	b	b	a	b	
06	08-10-12-14	16-18-20	10	15-20-25-30	35-40-45-50-55-60-65-70	104

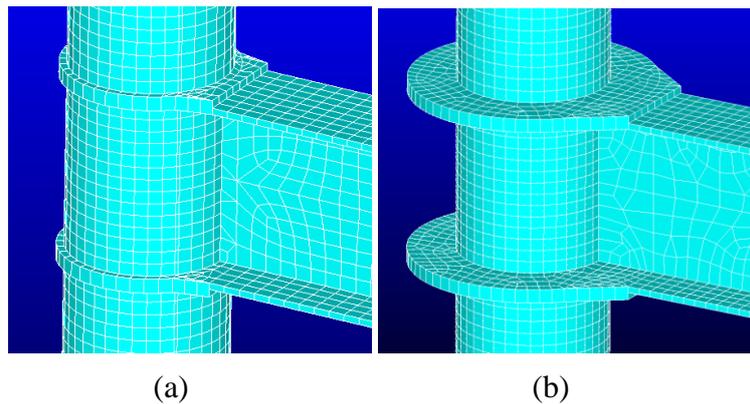


Figura 9. Modelo numérico da ligação com diafragma externo para  $t_d$  igual a 20mm, em (a)  $h_d=10$  mm e (b)  $h_d=70$  mm

### 3 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados da análise numérica do comportamento da resistência da ligação com diafragma externo. Inicialmente, será mostrada a validação do modelo numérico junto ao experimento TCR-W de Masioli (2011) e em seguida os resultados para diferentes geometrias do diafragma externo.

#### 3.1 Validação do modelo numérico

**Estudo do tamanho do elemento.** A Figura 10 mostra a convergência dos resultados para relação entre a força última resistente e o aumento do número de elementos, conforme redução das suas dimensões. A dimensão do elemento adotado é mostrada na Tabela 6, onde a diferença da força última a partir desse resultado é estável.

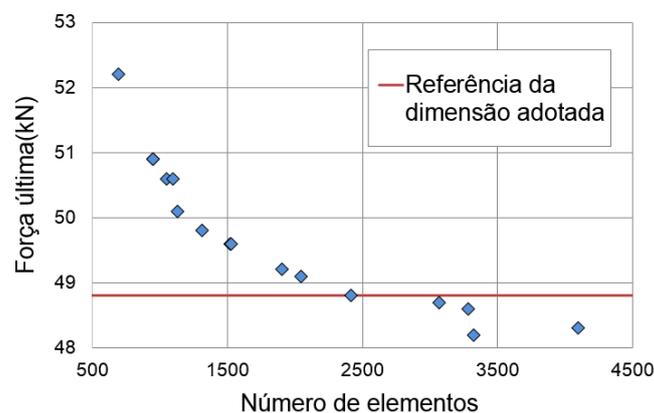


Figura 10. Comportamento entre força e deslocamento para diferentes tamanho do elemento

Tabela 6. Características numéricas para o modelo escolhido

Força (kN)	Dimensão do elemento (mm)		Número de elementos
	Padrão	Refinado	
48,80	95,0	19,0	2416

**Comparação com modelo experimental TCR-W.** Após escolha do tamanho do elemento, será feito a validação do modelo numérico. O objetivo é representar o mais próximo possível as características do seu respectivo modelo experimental. Na Figura 11 tem-se o estudo comparativo do deslocamento da extremidade da viga entre o modelo numérico e o experimento TCR-W de Masioli (2011).

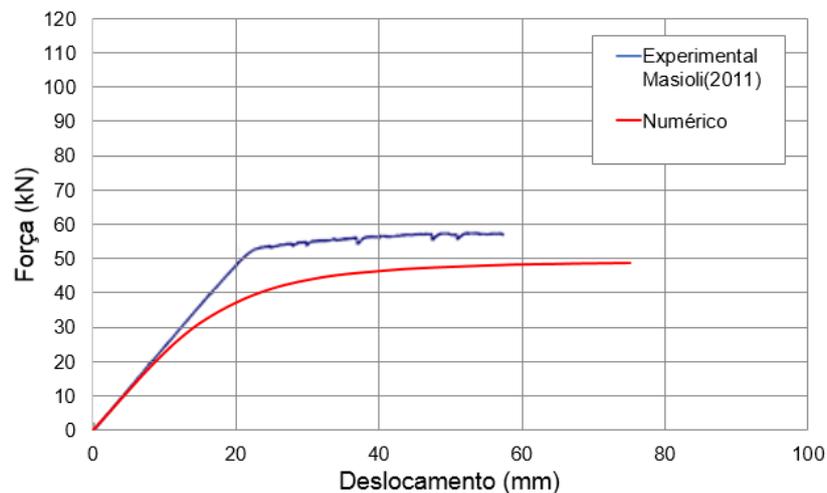


Figura 11. Comparativo entre modelo numérico e experimental

Na fase inicial do carregamento, é possível verificar que as curvas são compatíveis entre si, apresentando mesma relação de força e deslocamento. No entanto, conforme aumento da carga, o modelo numérico se distancia do experimental, apresentando maior deslocamento. Masioli (2011) descreve em seu trabalho que a possível diferença entre as curvas seja a não consideração da solda, devido ao alívio da concentração de tensões que proporciona na face do pilar. Porém, como o objetivo deste trabalho é análise da ligação com diafragma externo, o qual proporciona alívio da concentração de tensões na face do pilar, é possível considerar que o modelo numérico representa o modelo experimental.

**Comportamento da ligação sem diafragma externo.** Após validação do modelo numérico, foi realizada uma breve análise do comportamento estrutural da ligação sem diafragma externo entre viga e pilar. Inicialmente será apresentada a consideração ou não da restrição lateral para condição de contorno, de acordo com a Figura 12. A não ponderação dessa restrição implica em grandes deformações na extremidade da viga, com pequena diferença da força resistente. Além disso, ressalta-se que para ligação com diafragma externo, os grandes carregamentos e conseqüentemente as grandes deformações distorceriam as relações entre força e deslocamento.

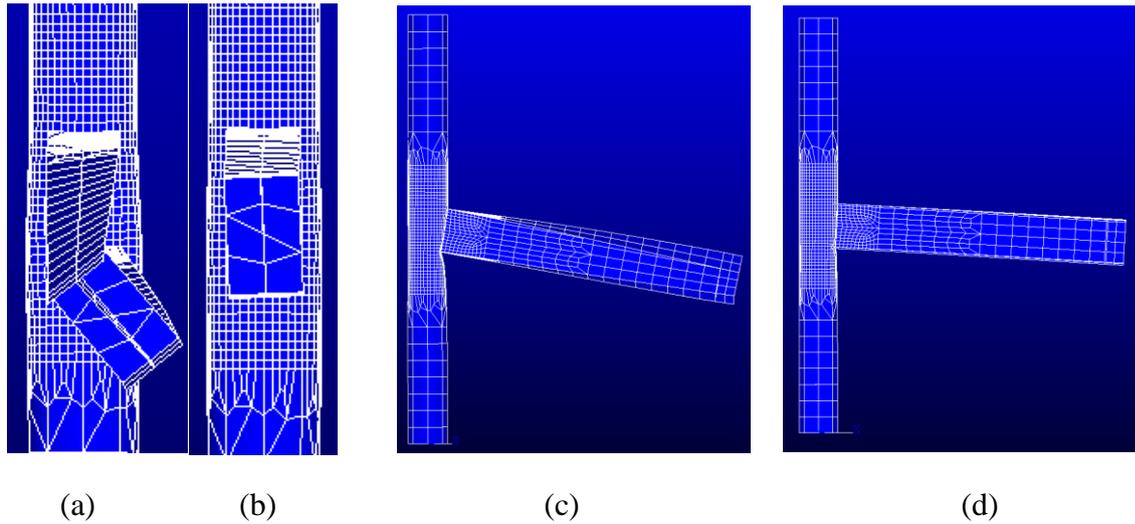


Figura 12. Comparação da deformação na extremidade da viga: sem restrição ao deslocamento (a) e (c); com restrição, (b) e (d)

Observado o comportamento e a influência do travamento lateral da viga, segue a análise do comportamento da ligação e a rotação da viga, conforme Figura 13.

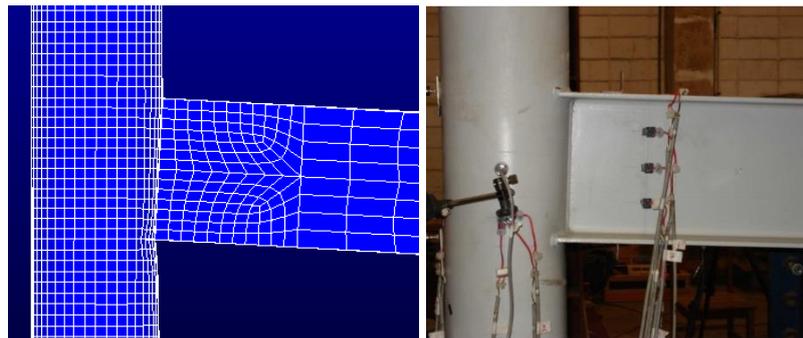


Figura 13. Comparativo da deformada para a força última entre o modelo numérico e o experimental de Masioli (2011)

Na Figura 14 são apresentadas as tensões no modelo, onde para regiões mais claras, tem-se as maiores tensões, destacando sua concentração na face do pilar.

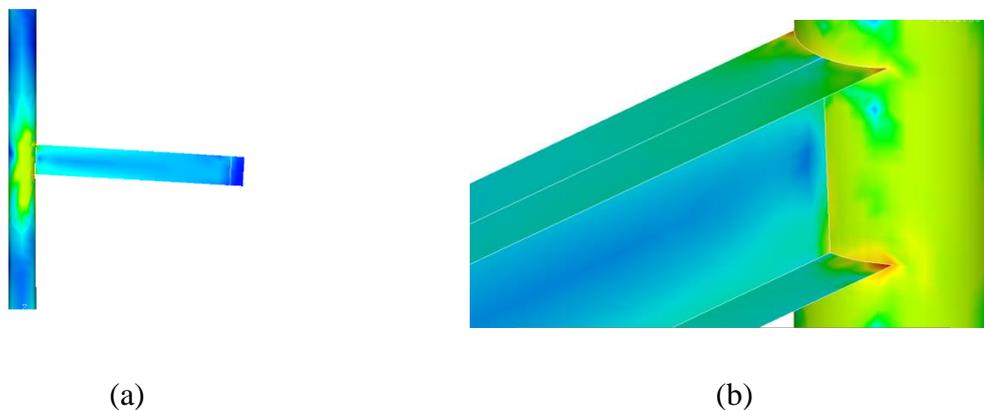


Figura 14. Comportamento das tensões no modelo numérico

Na Figura 15, tem-se comportamento numérico do momento versus rotação para o modelo TCR-W, e na Tabela 7 os parâmetros adotados para o modelo numérico sem diafragma externo.

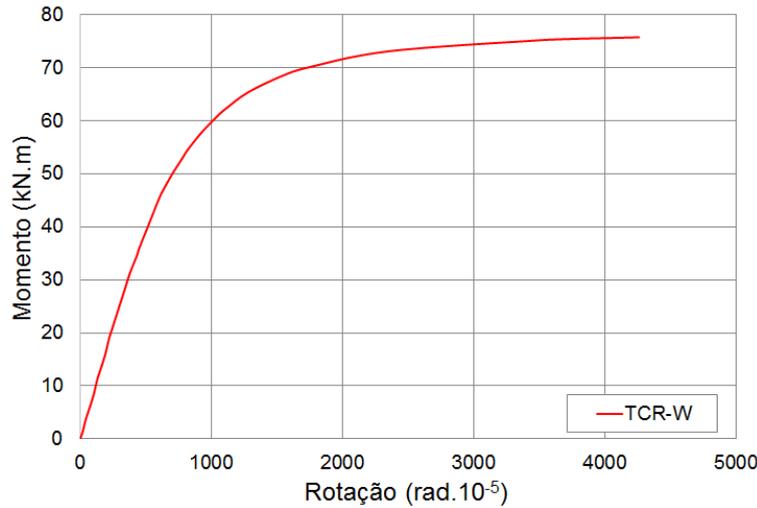


Figura 15. Comportamento da ligação para o modelo numérico TCR-W

Tabela 7. Principais parâmetros para ligação entre viga e pilar

Força Máxima (kN)	Rigidez Inicial (kNm/rad)
48,80	8331

### 3.2 Ligação com diafragma externo

**Comportamento da ligação.** Inicialmente, será feita análise das curvas momento-rotação extraídas dos modelos numéricos no ANSYS (2013) para as larguras mínimas e máximas das espessuras consideradas, comparando com os limites geométricos do CIDECT. O objetivo dessa primeira análise é verificar possíveis variações não uniformes para as diferentes configurações do diafragma externo e validar, ou não, as características além dos limites estabelecidos por Kurobane (2004).

Para a menor largura do diafragma externo, verifica-se na Figura 16 o crescimento gradual tanto da resistência da ligação quanto da sua rigidez inicial. Tal formato acompanha os valores mínimos do CIDECT considerados neste trabalho, conforme Figura 17, compatibilizando os valores adotados além dos limites inferiores desse manual.

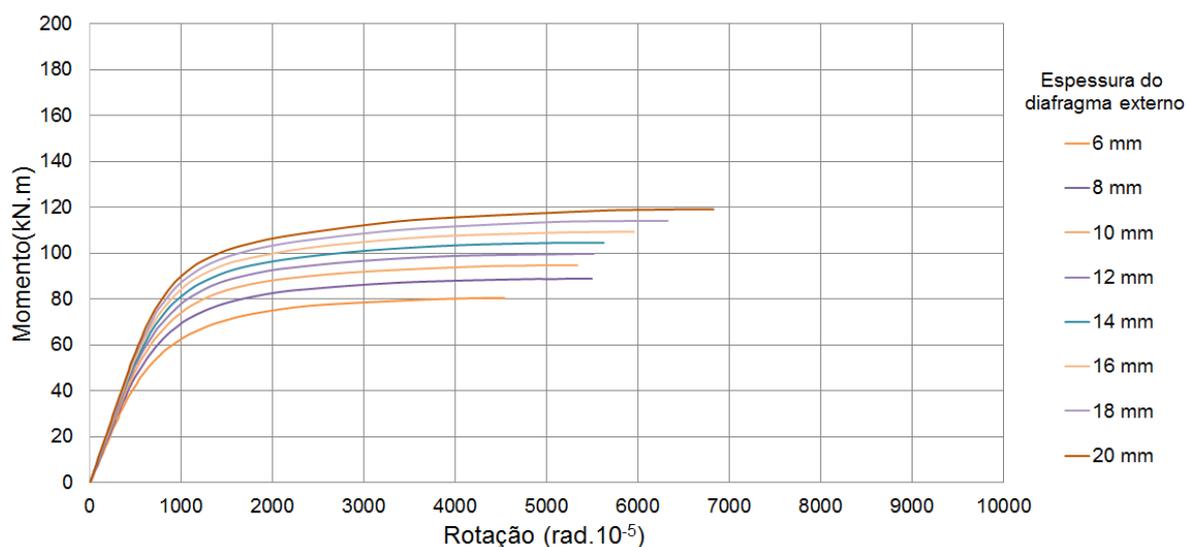


Figura 16. Comportamento da ligação,  $h_d=10$  mm

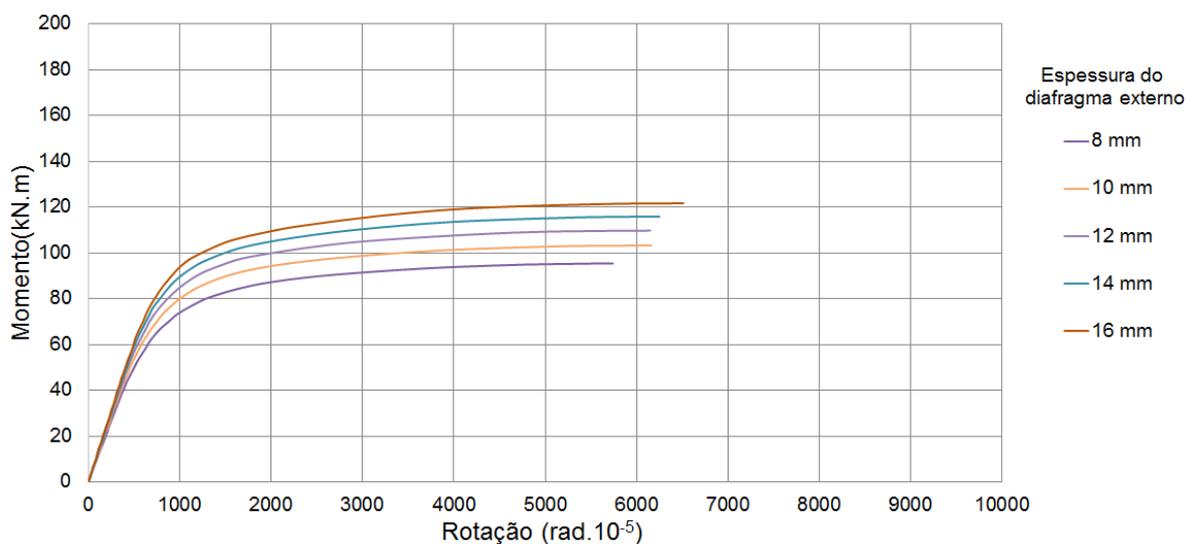


Figura 17. Comportamento da ligação,  $h_d=15$  mm

Para a largura superior, conforme Figura 18, tem-se aumento considerável da resistência da ligação e da sua rigidez inicial. No entanto acima da espessura de 12 mm, ainda ocorre crescimento da rigidez inicial, no entanto existe uma limitação da resistência a aproximadamente 190 kN, por conta da perda de estabilidade da viga no seu encontro com diafragma externo, especificamente flambagem local da mesa inferior conforme Figura 19.

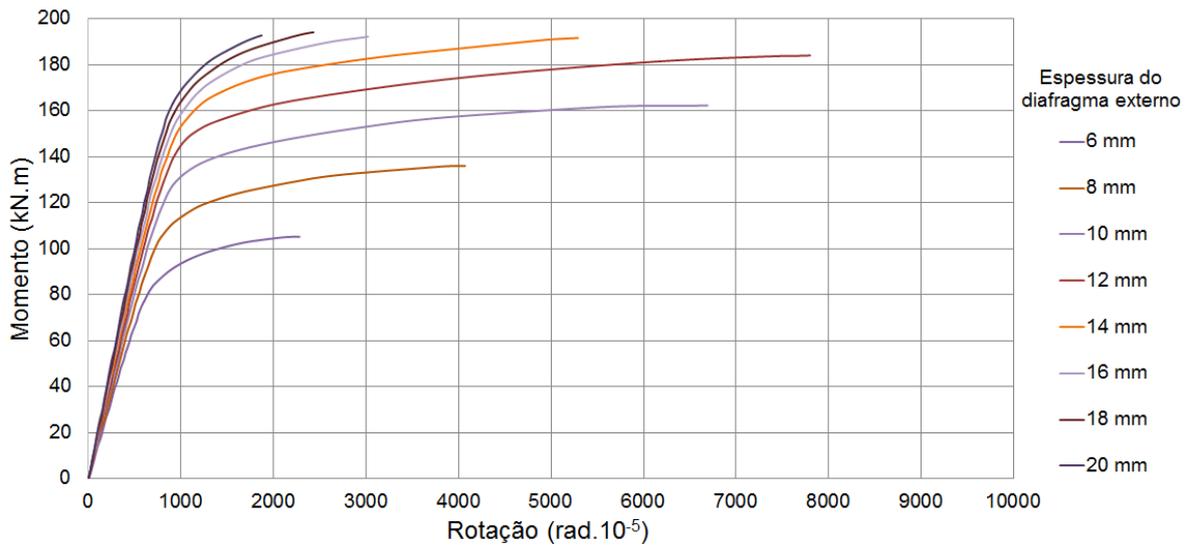


Figura 18. Comportamento da ligação para  $h_d=70$  mm

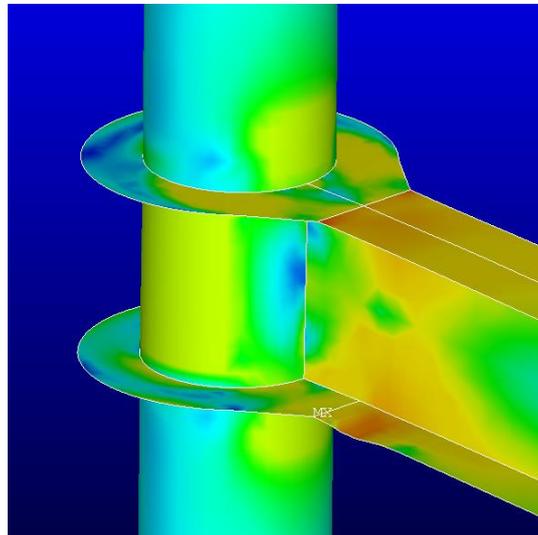


Figura 19. Flambagem local da mesa inferior da viga,  $t_d=20$ mm e  $h_d=70$ mm

Para efeito de comparação das curvas para os correspondentes limites do CIDECT, Figura 20, constata-se mesma correspondência, sendo também compatível os valores acima dos limites encontrados. Verifica-se também para as ligações com maior espessura do diafragma externo e menor largura, curva característica da formação da rótula plástica, não apresentando grandes deformações.

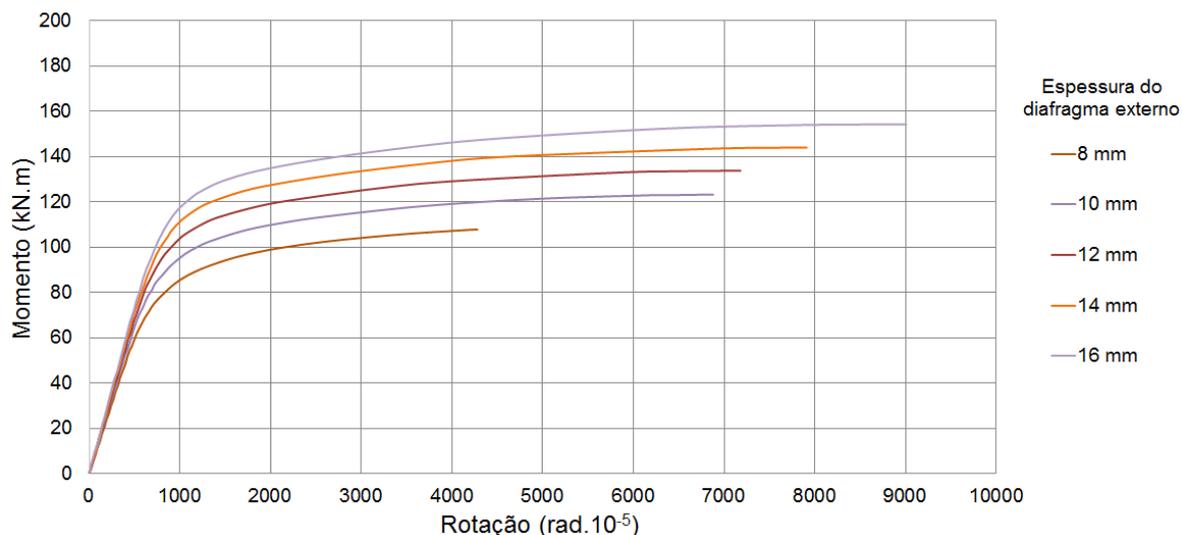


Figura 20. Comportamento da ligação para  $h_d=15$  mm

Após análise do comportamento da ligação para diferentes espessuras e larguras, é apresentado na Figura 21 comparativo das principais curvas momento-rotação estudadas.

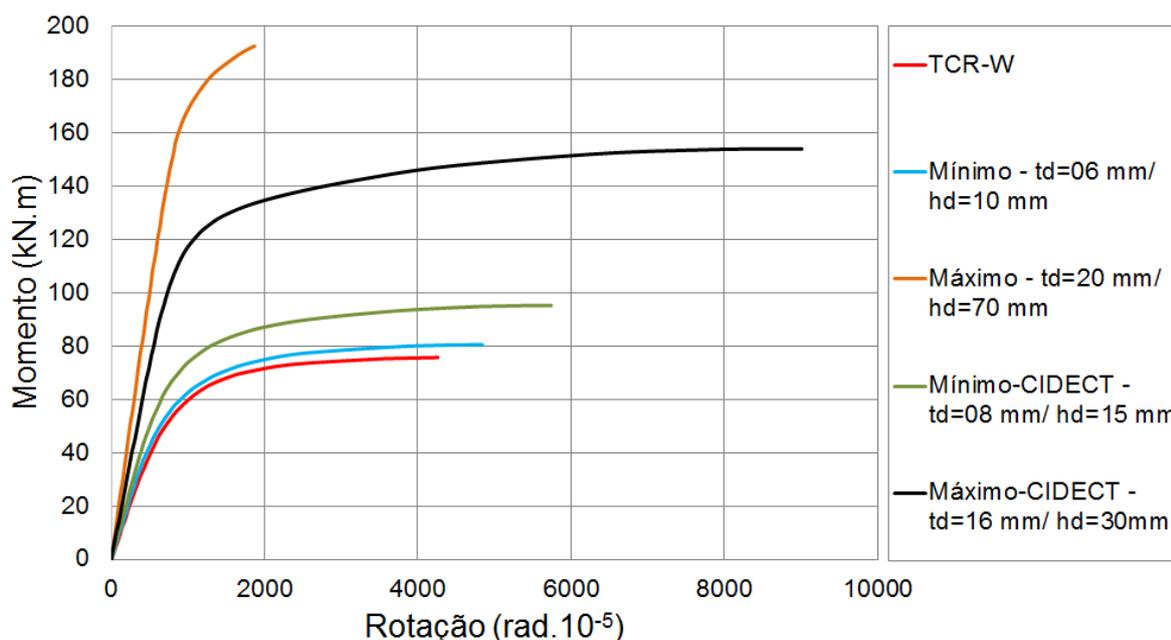


Figura 21. Comportamento da ligação para os valores extremos do diafragma externo

Assim é possível adotar valores além dos limites atualmente estabelecidos pelo CIDECT, tendo em vista a compatibilidade entre as curvas. Na Figura 22, tem-se o comportamento da ligação com diafragma externo para força máxima aplicada na extremidade da viga.

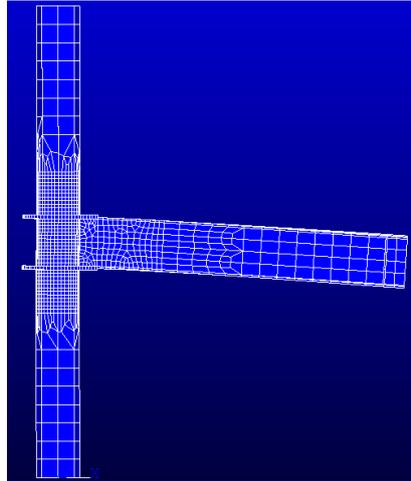


Figura 22. Estrutura deformada para valores máximos da espessura e largura do diafragma,  $t_d=20$  mm e  $h_d=70$  mm

**Rigidez inicial e resistência máxima.** Para a rigidez inicial da ligação, na Figura 23, tem-se aumento considerável do seu valor conforme acréscimo da área da seção do diafragma externo, além da relação dessa área com a rigidez inicial no modelo TCR-W.

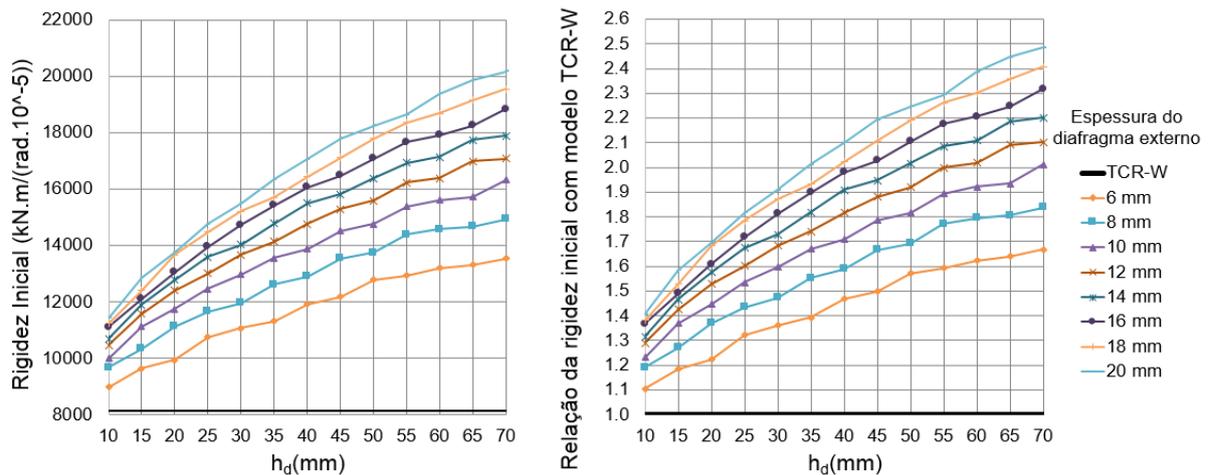


Figura 23. Comportamento da rigidez inicial conforme variação da geometria do diafragma externo

Para o momento máximo, tem-se o comportamento para as diferentes larguras de diafragma externo conforme Figura 24. Onde, após ganhos consecutivos de resistência, tem-se o limite de aproximadamente 190 kN, referente a perda da estabilidade da viga junto ao diafragma externo. Também é apresentado relação de ganho de resistência em comparação com o modelo numérico TCR-W. Sendo possível notar maiores ganhos de resistência para maiores valores de espessura.

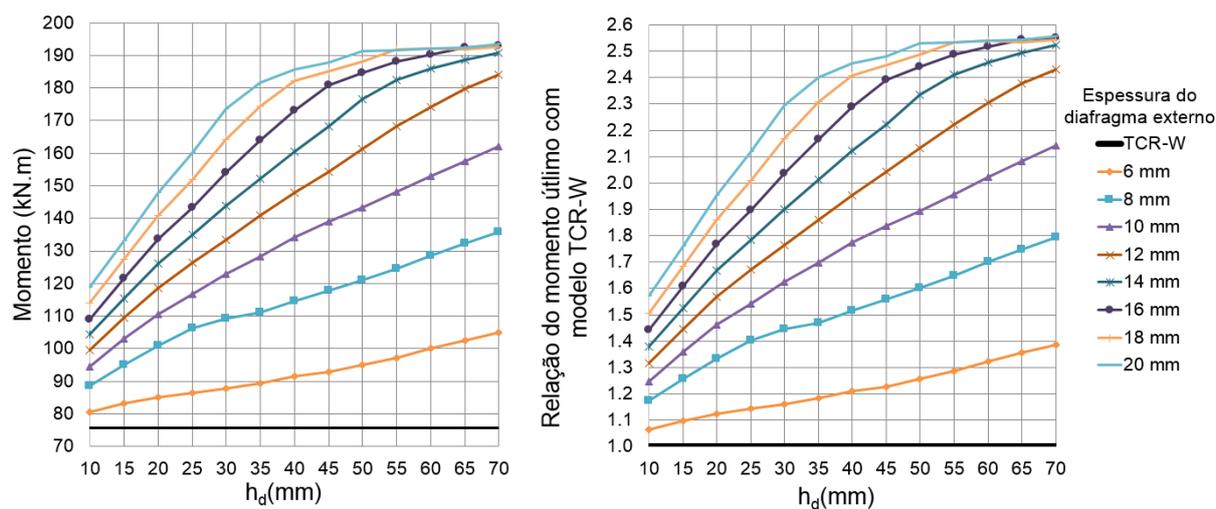


Figura 24. Força última da ligação com diafragma externo. Relação do ganho de força com o modelo TCR-W

## CONCLUSÕES

Neste artigo foi analisado numericamente o comportamento da ligação com diafragma externo entre viga I e pilar tubular circular. Foi constatado que o uso do diafragma externo proporcionou ganho considerável da resistência e da rigidez inicial, sendo recomendada sua aplicação para alívio de tensões na face do pilar e redução dos efeitos de flambagem local na região da ligação. Ao utilizar o diafragma constatou-se que houve aumento da resistência com o aumento de sua espessura. Também ocorreu um aumento da resistência para ligações com maiores larguras do diafragma.

Além disso, verificou-se a compatibilidade das curvas momento *versus* rotação para a geometria além dos limites estabelecidos pelo CIDECT, sendo sugerida uma reavaliação dos seus valores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio recebido pelo PPGEC/UFES – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de normas Técnicas – ABNT. NBR 8800, 2008. *Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de normas Técnicas – ABNT. NBR 16239, 2013. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*. Rio de Janeiro.

American National Standards Institute - American Institute of Steel Construction - ANSI/AISC 360-10, 2010. *Specification for structural steel buildings*. Chicago.

ANSYS Inc. Mechanical APDL Product Launcher, version 15. Canonsburg: Ansys Inc., 2013.

- Carvalho, P.H., 2005. *Avaliação numérica do comportamento estrutural de ligação entre pilar de seção tubular circular e viga de seção "I"*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1, 2005. *General rules and rules for buildings*. Bruxelas, Bélgica.
- Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8, 2005. *Design of Joints*. Bruxelas, Bélgica.
- Ferreira, W. G., Silveira, Ricardo A. M., & Badke Neto, A., 2008. *Conceitos e Terminologias da Estabilidade Estrutural*. In: XXXVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, São Paulo. XXXVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, v. 1. p. 115.
- Freitas, P. C. B., 2009. *Análise numérica de ligações metálicas viga-coluna com coluna tubular circular*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Kurobane Y., Packer J.A., Wardenier J., Yeomans N., 2004. *Design Guide 9: Design guide for structural hollow section column connections*. Köln: CIDECT and Verlag TÜV Rheinland.
- Masioli, C. Z., 2011. *Análise teórica e experimental de ligações em aço entre pilar tubular de seção circular e viga de seção I*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Pereira, D. H. F., 2013. *Análise do comportamento estrutural de ligações em aço entre viga de seção I e pilar de seção tubular circular*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Sabbagh, A.B.; Chan, T.M.; Mottram J.T., 2013. *Detailing of I-beam-to-CHS column joints with external diaphragm plates for seismic actions*. Journal of Constructional Steel Research, p. 31-33.
- Velasco P. C. G. S., Lima L. R. O., Andrade S. A. L., Velasco M. M. B. R., Silva L. A. P. S., 2014. *Modelagem de estruturas de aço e mistas*. Elsevier