



ANÁLISE NUMÉRICA DA LIGAÇÃO SOLDADA TIPO XX ENTRE PILAR TUBULAR DE SEÇÃO CIRCULAR E VIGA DE SEÇÃO I

Numerical analysis of welded connection type XX between I-beam and circular hollow section column

Ana Carolina Scampini Rangel Orrico (1); Macksuel Soares de Azevedo (2); Jorge Munaiar Neto (3)

(1) Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(3) Dr. Prof., Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo – SP, Brasil

Email para Correspondência: macksuel.azevedo@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: O equilíbrio entre aspectos estruturais e arquitetônicos em uma estrutura de aço sugere a associação entre vigas de seção I e pilares de seção tubular circular em prol de um dimensionamento eficiente. Este trabalho tem como objetivo propor estratégia de modelagem computacional com vistas à análise numérica da ligação tipo XX que ocorre entre pilar tubular de seção circular e viga de seção I, com ênfase na definição do elemento que melhor representa o comportamento da solda entre os perfis. Os modelos numéricos serão validados tendo como base os resultados experimentais obtidos e disponibilizados em Winkel (1998). Para análise desse tipo de ligação, serão propostos e desenvolvidos modelos numéricos via Método de Elementos Finitos utilizando ferramentas do pacote computacional ANSYS. Os resultados obtidos após as análises realizadas permitem demonstrar que o modelo em que se utilizou a solda com o elemento tipo casca foi o que obteve melhores resultados.

Palavras chaves: Estruturas de aço, pilar de seção tubular circular, ligações viga-pilar, ligações soldadas.

Abstract: The balance between structural and architectural aspects in a steel structure suggests the association between I-beam and circular hollow section columns for efficient sizing. This work aims to study the computational modelling of the type XX connection between I-beam and circular hollow section columns, with emphasis on the definition of the element that best represents the behavior of the weld between the profiles. The numerical models will be validated based on the experimental results of Winkel (1998). For the analysis of the connections, numerical models will be developed via Finite Element Method (F.E.M.) using the ANSYS computer program. The results obtained after the analysis allow to demonstrate that the model in which the weld was used with the shell element was the one that obtained better results.

Keywords: Steel structures, circular hollow section columns, beam-column connections, weld connections.

1 INTRODUÇÃO

Nas estruturas de aço das edificações nota-se uma ampla exploração das formas arredondadas, onde o aspecto estético e a eficiência estrutural proporcionada pela seção circular são fatores importantes na concepção do projeto estrutural.

Em se tratando dos aspectos estruturais, a utilização de pilares de seção tubular circular proporciona vantagens em relação às seções abertas, tais como:

- a) A possibilidade de preenchimento com concreto, proporcionando assim, elevadas resistência e estabilidade estrutural, além da boa resistência ao fogo;
- b) Coeficientes de arrasto reduzidos quando expostas aos esforços devido ao vento ou água;
- c) Redução da área superficial comparada às seções abertas equivalentes, gerando assim uma superfície menor a receber, por exemplo, pintura;
- d) Elevada capacidade para resistir a esforços de compressão, em relação a uma seção aberta com massa linear equivalente;
- e) Simetria em qualquer direção que passe pelo seu centro de gravidade, possui centro de gravidade (CG) e centro de cisalhamento (CC) coincidentes e, devido às características geométricas, apresenta rigidez à torção consideravelmente superior à de seções abertas equivalentes.

Vale destacar que as propriedades geométricas da seção circular a credenciam para utilização em elementos submetidos, principalmente, a esforços axiais. Adicionalmente, com relação à estrutura de um edifício de múltiplos pavimentos verifica-se a necessidade da presença de vigas para a sustentação dos pavimentos, tendo como consequência predominância de esforços de flexão e a necessidade de geometria eficiente para este tipo de solicitação. Para as vigas, a seção do tipo I (dentre as comercialmente utilizadas) é a que melhor apresenta aproveitamento do material sob a predominância de esforços de flexão. A variedade dimensional e o processo de fabricação corroboram na opção por essa seção geométrica nas vigas de uma estrutura de aço.

Por outro lado, o equilíbrio entre aspectos estruturais e arquitetônicos em uma estrutura de aço sugere a associação entre vigas de seção I e pilares de seção tubular circular em prol de um dimensionamento eficiente. Frente às possibilidades estéticas e estruturais para fins de aplicação de seções tubulares circulares em elementos comprimidos, é cada vez maior o número de estruturas formadas por pilares tubulares circulares ligados às vigas de seção I.

Considerando o exposto, o presente trabalho tem como objetivo propor estratégia de modelagem computacional, para fins de análise numérica, que melhor represente a ligação tipo XX existente entre elementos de aço dos tipos pilar tubular de seção circular e viga de seção I, com ênfase na definição do elemento que melhor representa o comportamento da solda entre os perfis. Os modelos numéricos serão validados tendo como base os resultados experimentais obtidos e disponibilizados em Winkel (1998). Para análise das ligações serão desenvolvidos modelos numéricos via Método de

Elementos Finitos utilizando ferramentas disponibilizadas no pacote computacional ANSYS 19.0, em que serão analisados modelos sem solda entre os perfis, com solda utilizando-se o elemento de casca e elemento de volume. Ao final, pretende-se estabelecer uma metodologia de modelagem que mais se aproxime do comportamento real da estrutura.

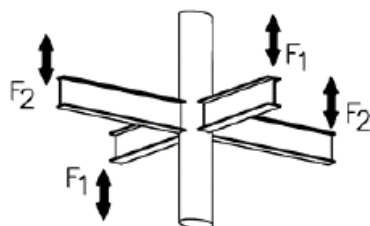
2 EXPERIMENTO DE WINKEL (1998)

Na última referência investigou-se experimentalmente ligações multiplanares do tipo XX avaliando os efeitos das diferentes geometrias de ligação e carregamentos, dividindo os modelos analisados em grupos 1, 2, 3 e 4.

Vale ressaltar que para fins de validação dos modelos numéricos propostos no presente trabalho optou-se pela utilização dos modelos do grupo 3, o qual se volta às ligações multiplanares do tipo XX com as vigas solicitadas por momento fletor atuante segundo o eixo de maior inércia da viga. A escolha deste grupo se justifica por ter sido utilizada, no experimento, solda na ligação entre a viga e o pilar possibilitando assim investigar a melhor estratégia de modelagem para representar o comportamento desta ligação. A descrição dos modelos do grupo 3 é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos modelos do grupo 3 (Winkel,1998)

Modelo	Steel deck	$\frac{F_2}{F_1}$
3C1	Não	0
3C2	Sim	0
3C3	Não	-1
3C4	Não	1



Pelo fato de o modelo 3C2 possuir forma de aço incorporada ao experimento, o mesmo não foi utilizado para validação deste trabalho. Os modelos 3C1, 3C3 e 3C4, diferem entre si apenas pelo sentido do carregamento conforme esquematizado por meio das Figura 1 a, b e c.

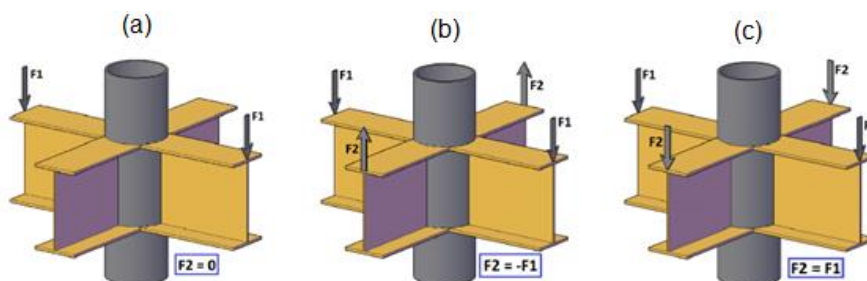


Figura 1. Análise experimental em Winkel (1998): (a) Modelo 3C1, (b) Modelo 3C2 e (c) Modelo 3C3

Fonte: (Pereira, 2014)

A Figura 2 apresenta o esquema do ensaio adotado, por meio do qual é possível constatar a imposição de limites no deslocamento do pilar em duas direções, bem como a fixação das vigas em um suporte de forma a restringir deslocamentos laterais. No experimento foram utilizadas restrições laterais na viga, impedindo-a de transladar fora do plano principal durante o carregamento. Para reduzir as deformações locais, o autor utilizou enrijecedores verticais na viga em pontos em que as forças foram aplicadas de forma localizada (pontual).

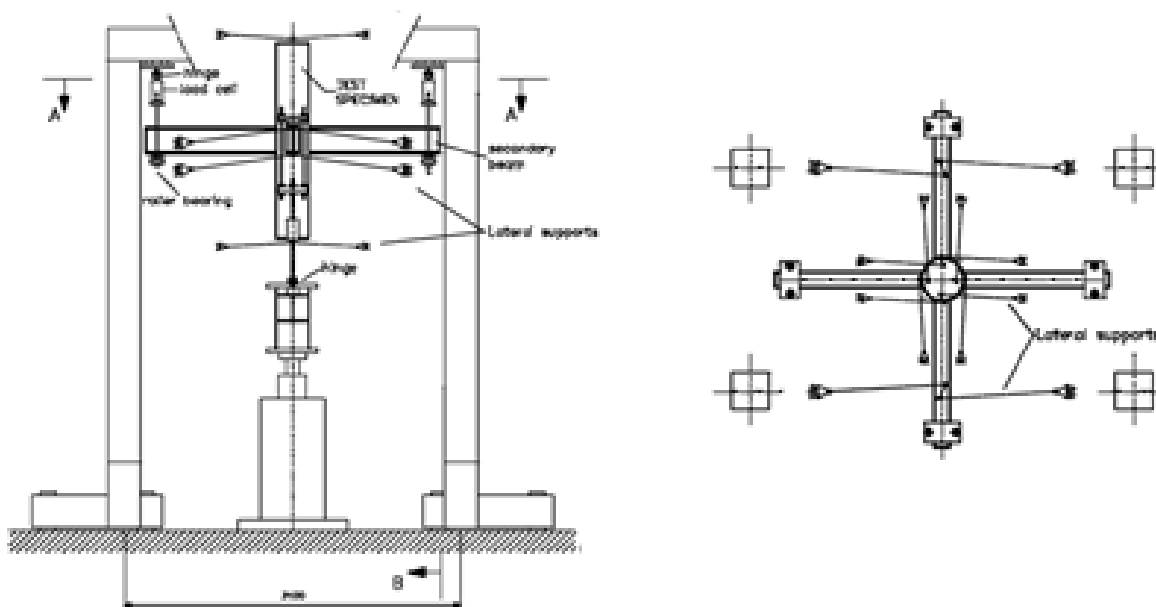


Figura 2. Esquema de ensaio utilizado por Winkel

Fonte: (Winkel, 1998)

As variáveis geométricas das seções transversais, enquanto dimensões dos protótipos ensaiados, estão esquematizadas na Figura 3.

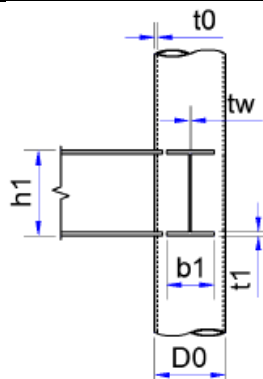


Figura 3. Parâmetros geométricos da ligação ensaiada
 Fonte: (Winkel, 1998)

A geometria dos modelos das ligações analisadas, enquanto dimensões das seções e respectivos comprimentos utilizados em Winkel (1998) se encontram na Tabela 2. Adicionalmente, as propriedades dos materiais utilizados nos modelos experimentais analisados em Winkel (1998) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Propriedades geométricas das seções e do protótipo de ensaio dos modelos experimentais (Winkel,1998)

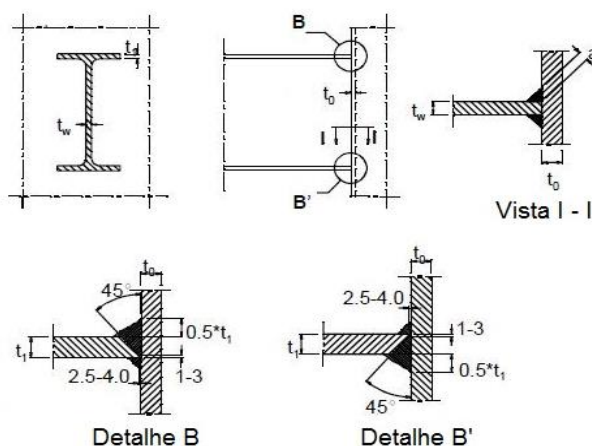
Modelo	PILAR		VIGAS				PROTÓTIPO ENSAIO			
	d_0	t_0	h_1	b_1	t_1	t_w	H_{pilar}	L_{viga}	L_1	L_2
3C1	323,9	9,5	240,0	120,0	9,8	6,2	2187,9	1210,7	350	400
3C3	323,9	9,5	240,0	120,0	9,8	6,2	2187,8	1210,1	350	400
3C4	323,9	9,5	240,0	120,0	9,8	6,2	2187,8	1210,1	350	400

* Dimensões em milímetros

**Tabela 3. Propriedades dos materiais dos modelos experimentais
(Winkel,1998)**

Modelo	Mod.	Poisson	PILAR		VIGAS	
	Elast.		f_y	f_u	f_y	f_u
	E		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
		ν				
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
3C1			387	510	421	516
3C3	200.000	0,3	387	510	433	526
3C4			387	510	433	526

No experimento a viga foi conectada ao pilar por meio de soldas com propriedades mecânicas nominais $f_y = 470 \text{ N/mm}^2$ e $f_u = 520 \text{ N/mm}^2$ para as soldas de topo, bem como $f_y = 408 \text{ N/mm}^2$ e $f_u = 511 \text{ N/mm}^2$ para as soldas em filete. Na Figura 4 observa-se os detalhes de solda executados nos modelos experimentais.



**Figura 4. Detalhes de solda dos modelos experimentais
Fonte: (Winkel, 1998)**

Para mensurar o deslocamento das vigas durante o experimento, foram instalados 4 transdutores elétricos ao longo das mesmas. Com os deslocamentos aferidos foi obtida a rotação (θ) relativa ao momento fletor dividindo-se a distância entre os transdutores pelo comprimento da viga.

Com isso, foi possível traçar os diagramas de momento *versus* rotação para cada modelo do experimento como mostrado nas Figuras 5, 6 e 7.

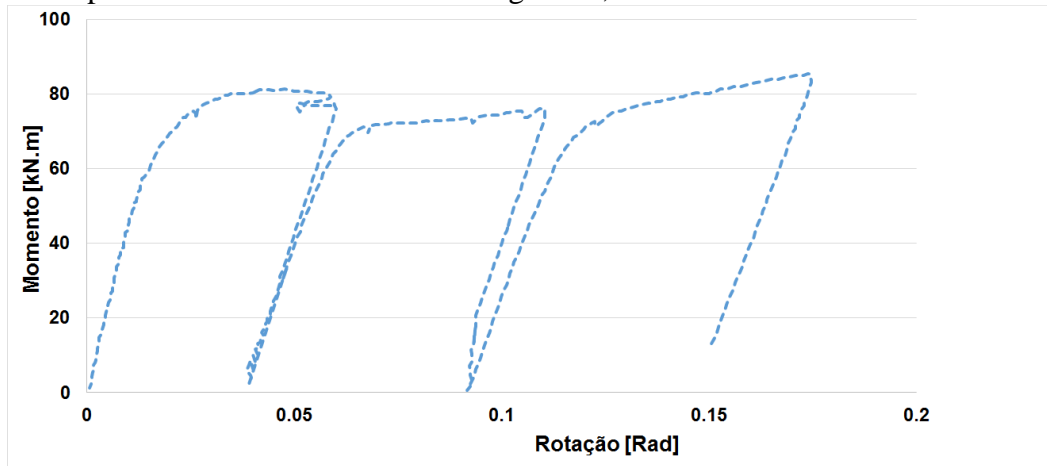


Figura 5. Curva momento *versus* rotação do modelo 3C1
Fonte: (Winkel, 1998)

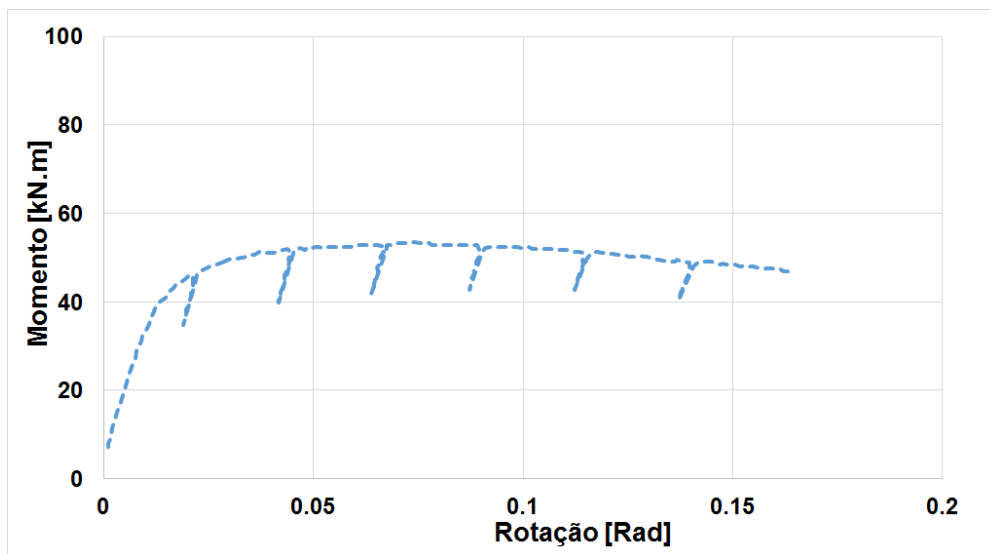


Figura 6. Curva momento *versus* rotação do modelo 3C3
Fonte: (Winkel, 1998)

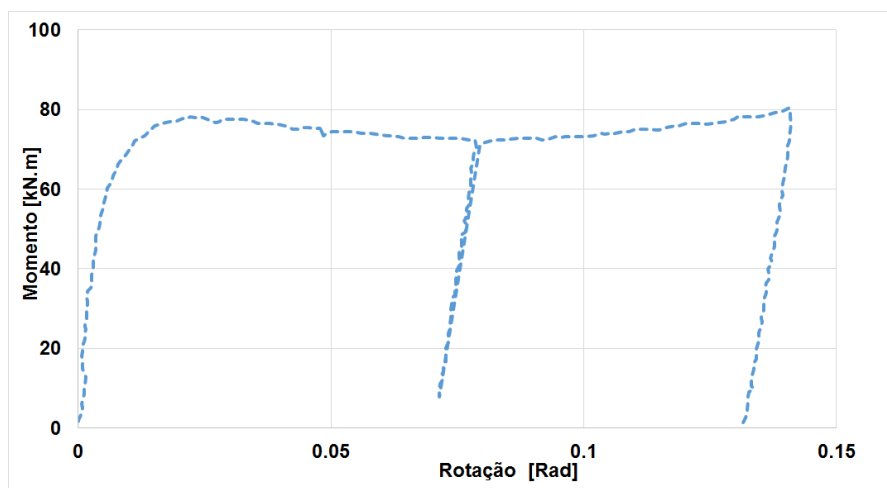


Figura 7. Curva momento *versus* rotação do modelo 3C4
 Fonte: (Winkel, 1998)

Os resultados da série 3 de Winkel (1998) são mostrados na Tabela 4, onde M_u é o momento último da ligação.

Tabela 4. Resultados dos ensaios do grupo 3
 (Winkel,1998)

Modelo	M_u (kNm)
3C1	82,5
3C3	60,5
3C4	79,7

Ao analisar os resultados obtidos, em Winkel (1998) se destaca que o modelo 3C4 apresentou redução em sua resistência uma vez que as vigas não estavam devidamente alinhadas quando soldadas ao pilar. Verificou-se que o eixo da alma da viga estava levemente rotacionado e não completamente perpendicular à face do pilar. Como resultado das análises experimentais, o autor destaca a predominância do modo de falha por plastificação da face do pilar, conforme ilustra a figura 8.

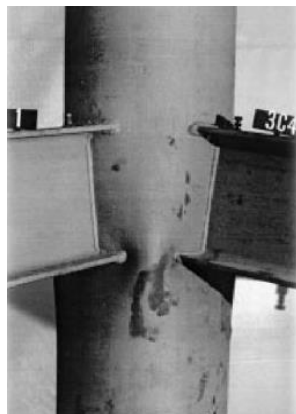


Figura 8. Plastificação da face do pilar no modelo 3C4
Fonte: (Winkel, 1998)

3 ANÁLISE NUMÉRICA

A constante necessidade em se obter resultados de maneira rápida e eficaz torna a modelagem numérica uma das principais ferramentas para a análise de estruturas. Análises experimentais continuam sendo fundamentais em pesquisas científicas, entretanto, a falta de recursos para aquisição de materiais e a alta disseminação de programas computacionais com base no Método dos Elementos Finitos, são fatores que impulsionam a escolha pelo uso dos códigos computacionais.

No presente trabalho foi proposto um modelo tridimensional construído em elementos finitos, no ambiente do pacote ANSYS 19.0, de forma a representar o mais fielmente possível o comportamento e a resposta real dos elementos estruturais em análise. Para validação dos resultados obtidos no modelo numérico foram adotados os resultados de ligação entre viga de seção I e pilar de seção tubular circular, conforme experimento de Winkel (1998).

Na análise numérica de seu modelo, Coutinho (2015) cita que o programa ANSYS v.13 recomenda a adoção do regime de grandes deslocamentos quando há a possibilidade de flambagem no modelo e conseqüentemente grandes deformações na estrutura. O protótipo de Winkel (1998), referência deste trabalho, apresentou grandes deslocamentos para a força máxima, o que justifica o uso desta teoria no modelo numérico.

Na resolução das equações de equilíbrio deste trabalho é adotado o método Newton-Raphson *full*, que leva em consideração os efeitos não lineares do comportamento estrutural e consiste em pequenos incrementos iterativos de carga, gerando pequenos deslocamentos que alteram a estrutura do modelo e ocasionam outros esforços. O colapso ocorre em estados avançados de carregamento e o critério de falha é a energia de distorção máxima (critério de von Mises).

A geometria do modelo numérico será a mesma utilizada por Winkel (1998) nos modelos da série 3 de seu experimento. Para a ligação entre o pilar tubular e a viga, o modelo será avaliado com três variações: sem solda, com solda utilizando elemento de volume, ou com solda utilizando elemento de casca.



Em todos os casos, a solda foi modelada com dimensão constante em todo o perímetro da ligação, conforme detalhamento demonstrado na Vista I-I da Figura 6.

A opção pela análise via Método dos Elementos Finitos recai na necessidade de se determinar os elementos finitos a serem utilizados para simular de maneira eficiente e satisfatória o comportamento da estrutura. Para isso, utilizou-se a biblioteca do programa computacional ANSYS 19.0 em conjunto com trabalhos desenvolvidos anteriormente que obtiveram resultados satisfatórios, para determinar o elemento finito mais adequado para o tipo de análise que se pretende.

A viga é composta por um agrupamento de placas correspondente às 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 é utilizado um elemento que represente o comportamento desses dois tipos de estruturas. Assim, o elemento adotado é o *Shell181* da biblioteca do ANSYS 19.0, governado pela teoria dia Mindlin-Reissner, derivado da análise de estruturas de placa fina e moderadamente espessa, condição para as formas que compõem a viga e pilar deste trabalho, o qual atende o caráter de grandes rotações e deformações não lineares e consiste em um elemento de 4 nós (i, j, k, l) com 6 graus de liberdade em cada nó, com translações nas direções x, y e z e rotações em relação aos eixos x, y e z.

Para modelagem das soldas, além do elemento *Shell181*, utilizou-se também o *Solid185* para verificar a diferença de comportamento entre elementos de casca e de volume.

O *Solid185* é um elemento de volume, que possui 8 nós (i, j, k, l, m, n, o, p) com três graus de liberdade em cada nó, com translação nas direções x, y e z.

Serão atribuídas à viga e ao pilar as propriedades mecânicas obtidas por Winkel (1998) em ensaios de caracterização conforme Tabela 3. Para todos os elementos dos modelos deste trabalho utilizou-se o diagrama multilinear, com os valores propostos por Maggi (2004), a partir de estudos experimentais realizados na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

O critério de plastificação adotado foi o de Von Mises, ou seja, a plastificação foi caracterizada tendo em vista as tensões equivalentes de Von Mises. Considerou-se o modelo de encruamento isotrópico.

A estrutura foi discretizada ao ponto de se obter a melhor relação entre os resultados com o mínimo esforço computacional. Para tanto, foram utilizados dois tipos de malha para o modelo, uma mais refinada, compreendendo a região da ligação a ser estudada, e outra menos refinada na região mais distante da ligação.

Para a escolha da dimensão ideal do elemento, realizou-se estudo de convergência, a partir da malha com dimensão igual a 50 mm, sendo reduzido a cada 10 mm. Adotou-se 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.

Com relação as condições de contorno e carregamento utilizadas na modelagem numérica. 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 mesas, e no ponto de aplicação da força, ou seja na extremidade da viga.

4 RESULTADOS

4.1 Estudo do tamanho do elemento

A Figura 9 apresenta o resultado do estudo da malha para o modelo de Winkel (1998). Foram solucionados modelos com malhas de 50, 40, 30, 25, 20, 15, 10, 9, 8, 7, 6 e 5 mm.

Observou-se que a malha de 10 mm já produz resultados indistinguíveis das malhas mais refinadas, sendo essa a escolhida.

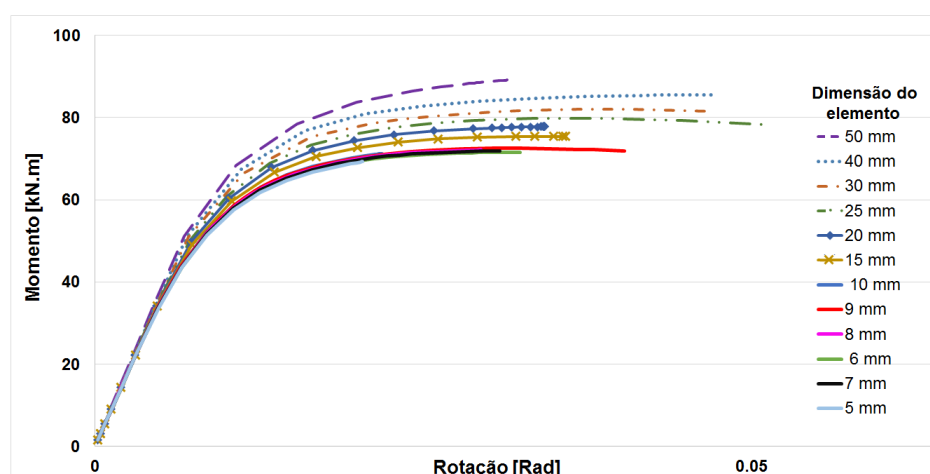


Figura 9. Estudo de malha para o modelo de Winkel (1998)

Fonte: (Autor,2018)

4.2 Curvas momento *versus* rotação

Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os experimentais, na forma de gráficos momento *versus* rotação. Seguem, nas Figuras 10 a 12, comparações dos resultados numéricos utilizando solda com elemento Shell 181, com elemento Solid 185 e, por fim, sem solda, com os resultados de Winkel (1998).

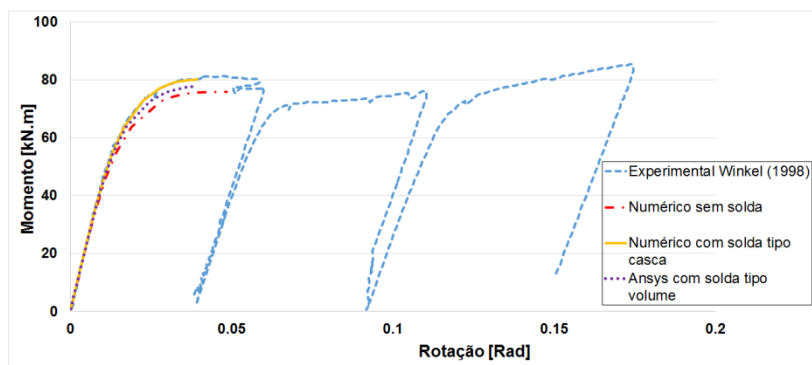


Figura 10. Curva momento *versus* rotação modelo 3C1
 Fonte: (Autor,2018)

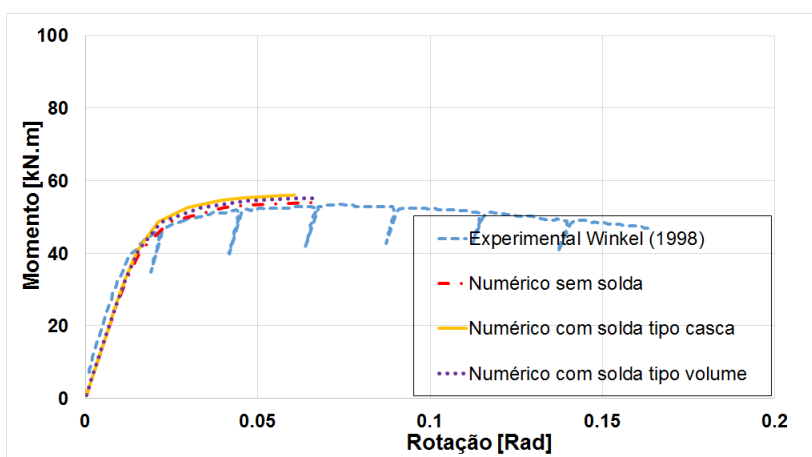


Figura 11. Curva momento *versus* rotação modelo 3C3
 Fonte: (Autor,2018)

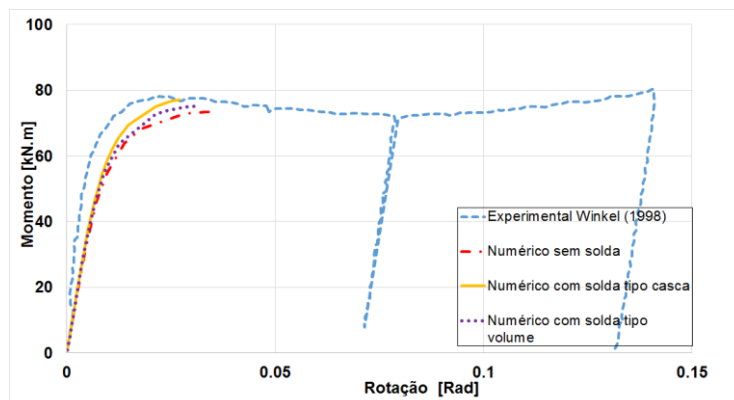


Figura 12. Curva momento *versus* rotação modelo 3C4
 Fonte: (Autor,2018)

Nos resultados da curva momento *versus* rotação de todos os modelos, verificou-se boa concordância com os resultados obtidos por Winkel (1998), sendo os que

utilizam a solda com elemento tipo casca, o que apresenta melhor concordância. O Modelo 3C4 é o que possui maior discordância de resultados, pois como já relatado anteriormente, o autor relata problemas de execução no modelo experimental.

4.3 Valor da força resistente

A carga máxima alcançada na análise numérica deve estar próxima do valor obtido experimentalmente, no caso, utilizaremos o momento último.

A tabela 5 resume as diferenças entre os momento último obtidos nas análises sem solda, com solda com elemento tipo Shell 181 e tipo Solid 185.

Tabela 5. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais dos ensaios

Modelo	M_u (kN.m)				
	Experimental Winkel	Numérico Winkel	Ansys		
			Shell	Solid	S/ solda
3C1	82,5	82,1	80,25	77,67	75,86
3C3	54,1	60,5	56,02	55,14	53,98
3C4	79,0	79,7	77,08	75,20	73,44

Os resultados demonstram boa correspondência com os obtidos por Winkel (1993), sendo o modelo em que foi utilizada a solda com elemento tipo Shell 181 o que mais se aproxima do experimento.

4.4 Modo de Colapso

Na Figura 16 verifica-se a deformada da ligação da viga I com o perfil tubular circular, demonstrando a falha por plastificação na face do pilar, conforme verificado no experimento de Winkel (1998).

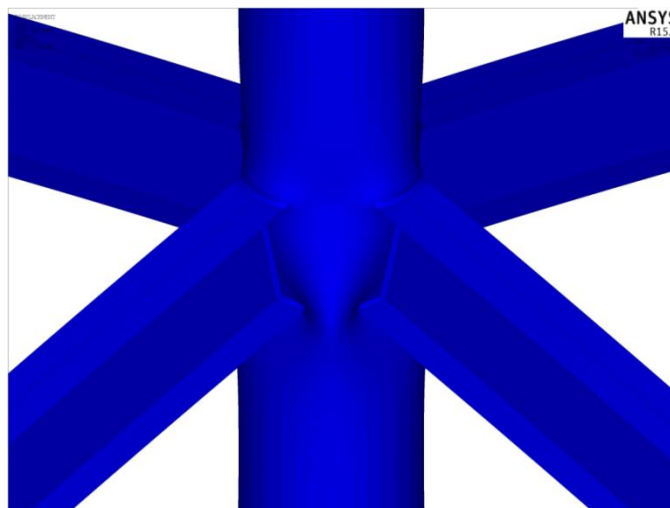


Figura 16. Deformada do modelo numérico
Fonte: (Autor,2018)

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi estudar a modelagem computacional da ligação tipo XX entre pilar tubular de seção circular e viga de seção I, com ênfase na definição do elemento que melhor representa o comportamento da solda entre os perfis.

A metodologia de modelagem numérica seguida apresentou boa correlação com os resultados experimentais de Winkel (1998), sendo que o modelo em que se utilizou a solda com o elemento tipo casca (Shell 181) foi o que obteve melhores resultados. Permite-se concluir que, a boa aproximação entre os resultados numéricos e experimentais, demonstra a boa representatividade da simulação numérica na obtenção da resistência das ligações.

AGRADECIMENTOS

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



REFERÊNCIAS

Coutinho, F.G., 2015. *Comportamento estrutural de ligações de aço com diafragma externo entre viga de seção I e pilar tubular de seção circular*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

Maggi, Y.I., 2004.. *Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia 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.

Wardenier, J. et al., 2010. *Hollow sections in structural applications*. 2 ed. Geneva: CIDECT and Verlag TÜV Rheinland. 240 p.

Winkel, G. D., 1998. *The static strength of I-beam to circular hollow section column connections*. Tese (PhD) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft.