

ANÁLISE DO EFEITO DE ABERTURAS NA ALMA NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS DE AÇO

Flávio Rodrigues¹, Luciano R. O. de Lima^{2*}, Pedro. C. G. da S. Vellasco²,
Sebastião A. L. de Andrade² e José G. S. da Silva³

1: PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5016A. Maracanã, RJ, Brasil – CEP 20550-900
e-mail: oflaviorodrigues@yahoo.com.br

2: Departamento de Estruturas e Fundações
Faculdade de Engenharia - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5016A. Maracanã, RJ, Brasil – CEP 20550-900
e-mails: {vellasco, lucianolima}@uerj.br, seb.andrade@uol.com.br

3: Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5016A. Maracanã, RJ, Brasil – CEP 20550-900
e-mail: jgss@uerj.br

Palavras-chave: Análise Numérica, Método dos Elementos Finitos, Mecanismo de *Vierendeel*, Abertura na Alma, Reforço na Alma, Vigas de Aço.

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo avaliar e descrever o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma de diferentes tamanhos e formas. Um estudo da influência do efeito do arredondamento das bordas dos furos também foram objetos de investigação. A metodologia empregada para tal estudo baseou-se em uma análise paramétrica com o auxílio do método numérico dos elementos finitos.*

1. INTRODUÇÃO

Limitações de altura são frequentemente impostas à edificações de múltiplos pavimentos por regulamentos de zoneamento urbano, aspectos econômicos e considerações estéticas. Para se proporcionar a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço, um pé-direito alto é normalmente requerido, conduzindo muitas vezes à alturas inaceitáveis entre pavimentos de edificações. Várias são as soluções possíveis para se resolver esta limitação, dentre elas pode-se citar: vigas com inércia variável, *stub girders*, treliças mistas e vigas misuladas. Outra solução frequentemente utilizada é a abertura de furos na alma das vigas de aço para a passagem das tubulações de serviço.

Segundo Chung *et al.* [1]-[3], atualmente, existe uma tendência de se utilizar tubos de água e dutos de ar-condicionado de grandes diâmetros, cuja abertura na alma das vigas de aço pode chegar a 75% da altura da viga (ver Figura 1). A presença de grandes aberturas na alma das vigas de aço pode ter uma severa penalidade na capacidade de carregamento das vigas das edificações, dependendo da forma, do tamanho e da localização dos furos. Aberturas circulares e retangulares são frequentemente utilizadas, e reforços ao redor dos furos na alma podem ser necessários para um dimensionamento mais eficaz.

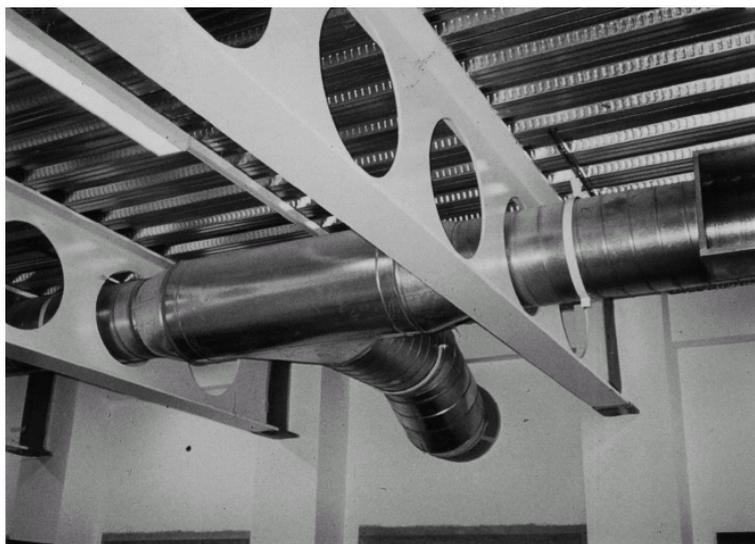


Figura 1. Viga com uma série de aberturas circulares [1]-[3].

Nas vigas de aço com abertura na alma, o mecanismo de *Vierendeel* ocorre devido à taxa de mudança do momento fletor (portanto da força de cisalhamento) ao longo do furo. Este aumento no momento fletor é resistido pelos “T’s” superior e inferior, através das respectivas resistências locais à flexão. A resistência local à flexão dos “T’s” pode ser aumentada por enrijecedores horizontais soldados abaixo e acima da abertura.

O mecanismo de *Vierendeel* é sempre crítico em vigas de aço com furo na alma. Enquanto a profundidade da abertura da alma controla as falhas por flexão e por cisalhamento das seções perfuradas, é o comprimento da abertura na alma que controla o mecanismo de *Vierendeel*, que por sua vez depende das resistências locais ao cisalhamento e à flexão dos “T”s superior e inferior.

Em uma seção perfurada submetida a momento global ($M_{o,Sd}$) e a uma força de cisalhamento global ($V_{o,Sd}$), três ações locais são induzidas nos “T”s superior e inferior, como mostrado na Figura 2, ou seja, força axial no “T”, N_T , devido ao momento global $M_{o,Sd}$; força de cisalhamento no “T”, V_T , devido à força de cisalhamento global $V_{o,Sd}$ e momento local no “T”, M_T , devido à transferência da força de cisalhamento $V_{o,Sd}$, ao longo do comprimento da abertura.

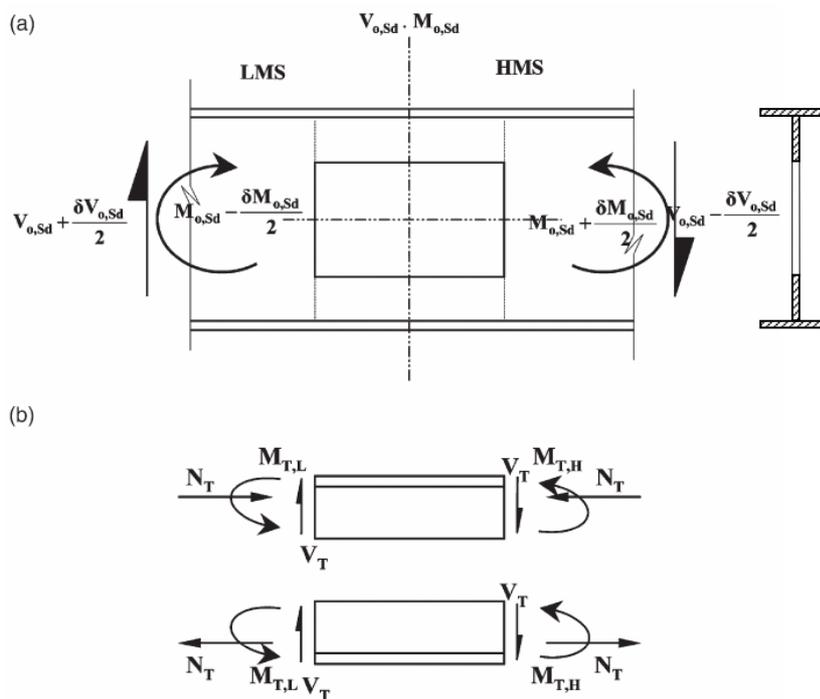


Figura 2. Distribuição de esforços na seção perfurada [1]-[3].

A presença de furos na alma de vigas de aço introduz três diferentes modos de ruína nas seções perfuradas que são: falha por cisalhamento devido à capacidade reduzida ao cisalhamento; falha por flexão devido à reduzida capacidade ao momento ou mecanismo de *Vierendeel*, conforme mostrado na Figura 3, devido à formação de quatro rótulas plásticas nos “T”s”, oriundas da transferência de cisalhamento lateral ao longo da abertura da alma.

Geralmente, as resistências ao cisalhamento e ao momento fletor das seções perfuradas podem ser prontamente avaliadas. Contudo, as resistências ao momento dos “T”s quando submetidos aos esforços locais de flexão são relativamente difíceis de serem avaliadas na

presença de esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, devido ao momento fletor global atuante na viga. Além disso, é necessária a utilização de dimensionamento plástico para incorporar a formação das quatro rótulas plásticas nos “T’s”, objetivando uma previsão aprimorada da capacidade de carga das vigas.

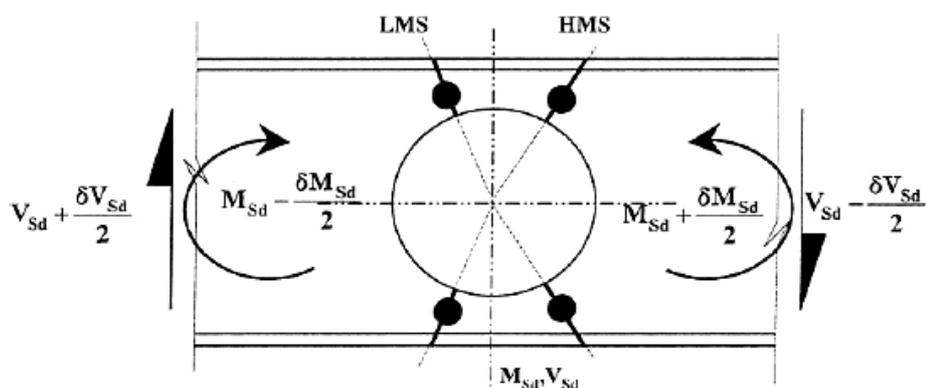


Figura 3. Mecanismo de Vierendeel ao longo de um furo circular [1]-[3].

Geralmente, um aumento na profundidade da abertura, d_o , sempre reduz a resistência ao cisalhamento e ao momento das seções perfuradas, e portanto, as falhas por cisalhamento e por flexão das seções perfuradas são controladas pela magnitude de d_o . Contudo, enquanto um aumento no comprimento da abertura, c , não afeta a resistência ao cisalhamento e à flexão das seções perfuradas, tal incremento aumenta diretamente o momento local de *Vierendeel* atuante nos “T’s”, e portanto, promove o mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas. Consequentemente, para furos na alma com os mesmos valores da abertura d_o , mas com diferentes valores do comprimento crítico da abertura c , a capacidade de carga das seções perfuradas é inversamente proporcional aos valores de c .

2. MODELO NUMÉRICO

2.1. Introdução

Com a finalidade de simular o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma, foram elaborados modelos em elementos finitos. Tais modelos foram calibrados a partir do trabalho de Chung *et al* [1]-[3], que por sua vez, baseou-se no resultado de ensaios experimentais realizados por Redwood & Mccutcheon [4] para a validação dos modelos propostos.

2.2. Características do modelo

Não-linearidades físicas e geométricas foram incorporadas aos modelos em elementos finitos, a fim de se mobilizar totalmente a capacidade de resistência ao momento dos “T’s” submetidos a esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, devido à ação de esforços

globais. Adicionalmente, a utilização de não-linearidade geométrica permite a previsão de grandes deformações, considerando a redistribuição de carregamento na alma ao longo da abertura após o escoamento inicial. Portanto, o mecanismo de *Vierendeel* com a formação das rótulas plásticas nos “T’s” pode ser avaliado detalhadamente.

Os modelos numéricos foram elaborados utilizando-se elementos de casca tipo **SHELL181** presente na biblioteca de elementos do programa Ansys versão 10.0 **Error! Reference source not found.** Este elemento é adequado para a análise de estruturas compostas por cascas que apresentam espessuras finas e médias. O elemento **SHELL181** é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó, ou seja, translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z.

Os apoios e as condições de carregamento das vigas de aço experimentais foram simulados nos modelos numéricos pela restrição dos graus de liberdade apropriados. Uma análise de sensibilidade da malha de elementos finitos foi realizada nos modelos numéricos de forma que a densidade da malha representasse adequadamente os efeitos oriundos dos carregamentos e das condições de contorno do modelo. Adotou-se a malha que, com o menor número de elementos finitos possível, representasse adequadamente os efeitos observados nos ensayos experimentais.

O aço dos modelos numéricos foi modelado de forma a exibir um comportamento elasto-plástico bilinear com um encruamento de 5% (ver Figura 4). Adotou-se um módulo de elasticidade para o aço de 205GPa. As tensões de escoamento e de ruptura do aço dos modelos, bem como suas propriedades geométricas, foram retiradas diretamente dos valores medidos nas amostras dos testes [4] para as vigas com apenas um furo na alma. Todas as vigas modeladas foram consideradas simplesmente apoiadas.

Durante a investigação numérica, foi necessário assegurar que a ruína do modelo não ocorresse por flambagem lateral à torção. Por isso, foram impostas restrições de deslocamento em pontos estratégicos ao longo da viga, a fim de se eliminar este fenômeno. Também não era desejável que o modelo falhasse por flambagem local. Para evitar tal tipo de falha, enrijecedores transversais foram incorporados aos modelos no ponto de aplicação da carga e nos apoios. A seguir, na Figura 5 e na Figura 6, respectivamente, apresentam-se os modelos utilizados por Chung *et al.* [1]-[3].

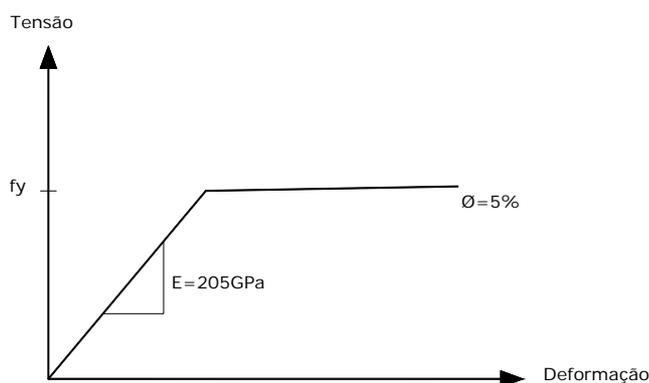


Figura 4. Curva tensão x deformação [1]-[3].

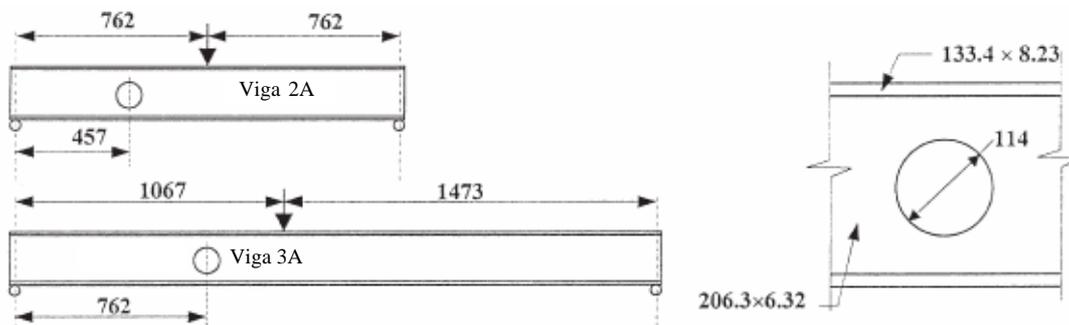


Figura 5. Geometria da viga modelada [1]-[3].

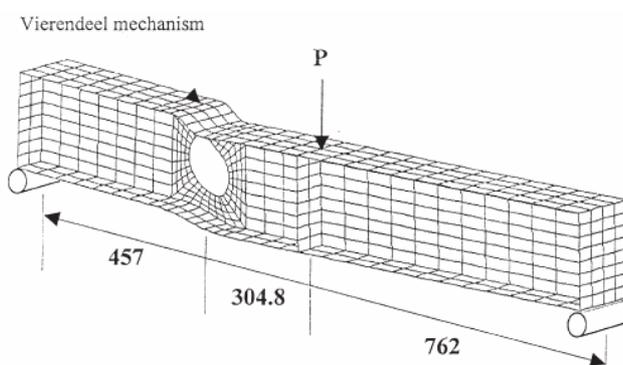


Figura 6. Modelo em elementos finitos desenvolvido por Chung *et al.* para a viga 2A [1]-[3].

Na Tabela 1 e na Tabela 2 são apresentadas as características físicas e geométricas das vigas modeladas por Chung *et al* [1]-[3], retiradas diretamente das amostras dos ensaios realizados por Redwood e McCutcheon [4].

		Viga 2A	Viga 3A
Banzos	Tensão de escoamento (MPa)	352	311
	Tensão de ruptura (MPa)	503	476
Alma	Tensão de escoamento (MPa)	376	361
	Tensão de ruptura (MPa)	512	492

Tabela 1. Resistências dos aços dos perfis [4].

Viga	Vão (mm)	Largura do banzo (mm)	Espessura do banzo (mm)	Altura da alma (mm)	Espessura da alma (mm)	Diâmetro do furo (mm)
Viga 2A	1524	133.4	8.23	206.3	6.32	114
Viga 3A	2540	133.4	8.23	206.3	6.32	114

Tabela 2. Propriedades geométricas dos perfis [4].

Os modelos numéricos apresentados nesta seção foram elaborados com as mesmas características básicas dos modelos desenvolvidos por Chung *et al.* [1]-[3]. Através da comparação direta dos resultados obtidos por Chung *et al.* [1]-[3], com os resultados obtidos a través dos modelos apresentados neste artigo, pôde-se verificar a acuidade e a relevância dos modelos apresentados, para posteriormente serem utilizados numa análise paramétrica de vigas de aço com furos na alma. A seguir, apresentam-se os modelos usados neste trabalho (Figura 7 e Figura 8) para comparação com os de Chung *et al.* [1]-[3] (Figura 5 e Figura 6).

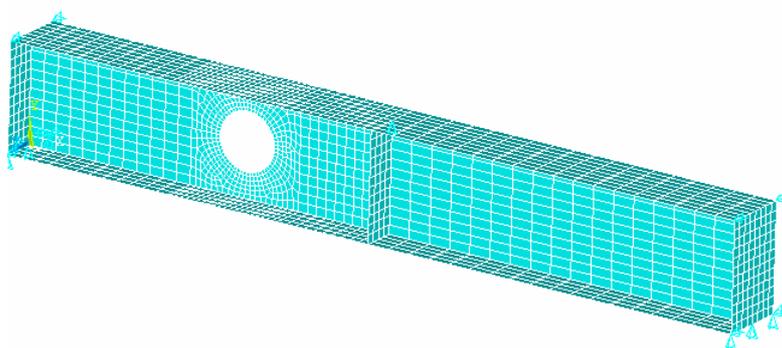


Figura 7. Modelo em elementos finitos utilizado para a viga 2A

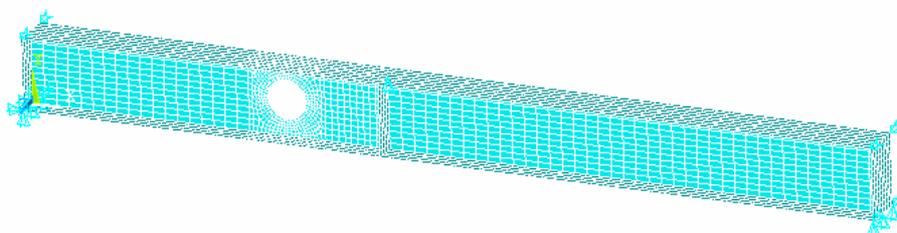


Figura 8. Modelo em elementos finitos utilizado para a viga 3A

Pode-se observar que os modelos apresentados são bastante semelhantes aos modelos propostos por Chung *et al.* [1]-[3]. A malha de elementos finitos na região ao redor das aberturas foi refinada para que os modelos pudessem representar de forma fidedigna os efeitos de concentração de tensão, escoamento da alma e das mesas, bem como a formação de rótulas plásticas, caracterizando assim, o mecanismo de *Vierendeel*. As condições de contorno dos modelos podem ser visualizadas nas figuras acima. O apoio do lado esquerdo das vigas

foi modelado de forma a representar um apoio do segundo gênero, enquanto o apoio no lado direito das vigas foi modelado para ser um apoio do primeiro gênero. Podem ser observados ainda, travamentos laterais na parte superior da viga (parte submetida à compressão) com o objetivo de prevenir a flambagem lateral à torção dos perfis. O ponto de aplicação da carga concentrada, bem como os enrijecedores transversais, podem ser vistos claramente nos modelos apresentados na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente.

Para confirmar a validade dos modelos propostos, apresentam-se gráficos comparativos entre os resultados obtidos em experimentos de Redwood e McCutcheon [4], para o momento fletor atuante no centro da abertura e a deflexão no meio do vão, e os modelos numéricos exibidos neste artigo para as vigas 2A e 3A (Figura 9 e Figura 10).

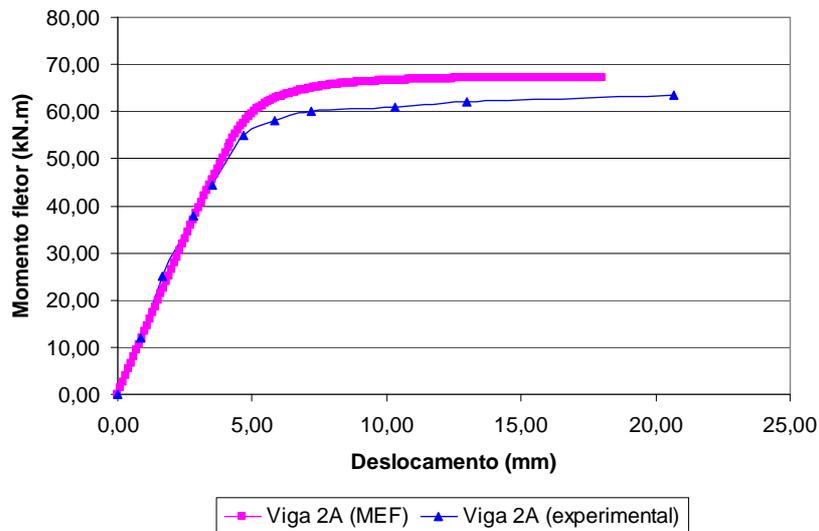


Figura 9. Comparação entre o MEF e os ensaios de laboratório para a viga 2A

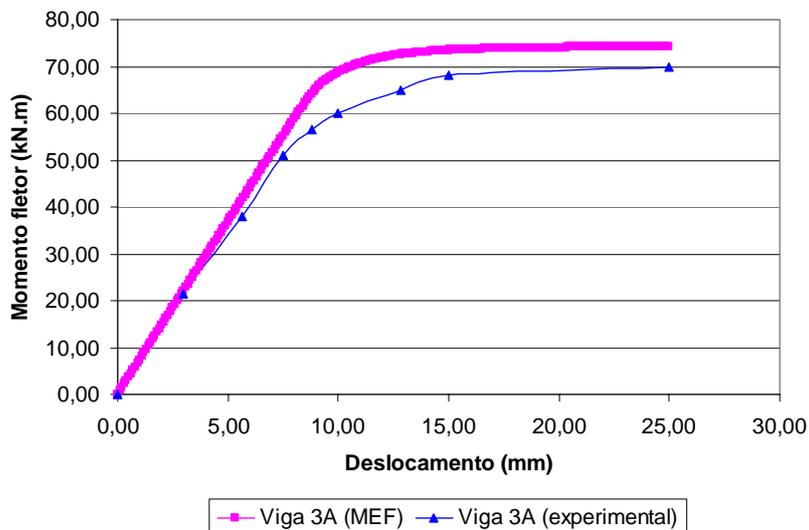


Figura 10. Comparação entre o MEF e os ensaios de laboratório para a viga 3A

Pode-se observar nos gráficos acima que os resultados obtidos através dos modelos numéricos utilizados neste trabalho apresentaram uma concordância razoável quando comparados com os resultados experimentais, sobretudo na fase elástica. Na fase plástica, há uma ligeira diferença entre os modelos numéricos e os resultados obtidos dos ensaios. Tal diferença provavelmente pode ser atribuída a adoção de um modelo de encruamento bi-linear na caracterização do material utilizado no modelo numérico.

Na Tabela 3 apresenta-se um resumo comparativo entre os resultados experimentais e os numéricos para as vigas 2A e 3A.

Viga	Momento resistente da viga sem furo (kN.m)		<u>Momento (exp)</u> Momento(MEF)	Momento de ruptura no centro do furo (kN.m)		<u>Momento (exp)</u> Momento(MEF)
	Experimental	MEF		Experimental	MEF	
Viga 2A	99,0	110,9	0,89	63,7	67,3	0,95
Viga 3A	88,7	103,7	0,86	69,0	74,1	0,93

Tabela 3. Quadro comparativo entre os experimentos e os modelos numéricos

A comparação dos resultados da modelagem numérica com os resultados experimentais, mostra boa concordância entre si, validando, portanto, a precisão dos modelos numéricos propostos.

3. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para o estudo do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma de formas variadas, foi realizada uma série de análises em elementos finitos [5]. As características físicas e geométricas de todos os perfis de aço utilizados nesta seção são apresentadas a seguir.

Perfil IPE750	Tensão de cedência (MPa)	460
---------------	--------------------------	-----

Tabela 4. Resistência do perfil IPE750

Perfil IPE750	Largura do banzo (mm)	Espessura do banzo (mm)	Altura da alma (mm)	Espessura da alma (mm)
	263	17	719	11.5

Tabela 5. Propriedades geométricas do perfil IPE750

Na Tabela 6 são apresentados os dados dos modelos analisados onde se varia o tipo de perfil, a altura do furo e o vão das vigas. Deve-se notar que nesta tabela são apresentadas a posição da abertura em função do comprimento L do vão, a altura do furo em função da altura H do perfil, o vão da viga, o tipo de furo, a localização da carga concentrada aplicada em função do comprimento L do vão, a carga de ruptura de cada viga e o mecanismo de ruína verificado. Deve-se observar que para os furos retangulares, sua largura é igual a duas vezes a sua altura.

Pode-se observar de imediato da Tabela 6 que todas as vigas com furo apresentaram ruína pela formação do mecanismo de *Vierendeel*, independentemente da geometria e da localização do furo. Pode-se notar também que as resistências das vigas diferem significativamente entre si, sendo a viga com furo circular a mais resistente, seguida pela viga com furo quadrado e finalmente pela viga com furo retangular. Até a viga com furo circular teve a carga de ruptura bastante penalizada quando comparada com a resistência de uma viga sem furo (cerca de 30%), mostrando que um furo com 75% da altura do perfil de aço é extremamente danoso.

ID	Perfil	Posição do furo	Altura do furo	Vão (mm)	Tipo de furo	Posição da carga	Carga de ruptura (kN)	Mecanismo de ruptura
1	IPE 750	Sem furo	Sem furo	6000	Sem furo	0,45L	1485,30	Flexão - ponto da carga
2	IPE 750	0,15L	0,75H	6000	Retangular	0,45L	206,07	Vierendeel
3	IPE 750	0,60L	0,75H	6000	Retangular	0,45L	244,73	Vierendeel
4	IPE 750	0,15L	0,75H	6000	Quadrado	0,45L	434,06	Vierendeel
5	IPE 750	0,60L	0,75H	6000	Quadrado	0,45L	501,64	Vierendeel
6	IPE 750	0,15L	0,75H	6000	Circular	0,45L	1.034,85	Vierendeel
7	IPE 750	0,60L	0,75H	6000	Circular	0,45L	1.091,55	Vierendeel

Tabela 6. Perfil IPE750, altura do furo = 0,75H e vão = 6,0m

Da Figura 11 a Figura 13 são mostradas as distribuições das tensões de *Von Mises* no instante da ruína para as vigas 2, 4 e 6 na Tabela 6. Pode-se verificar da observação destas figuras que em todas as vigas, independentemente da geometria do furo, houve a formação de quatro rótulas plásticas nas extremidades das aberturas na alma, caracterizando claramente a formação de um mecanismo de *Vierendeel*.

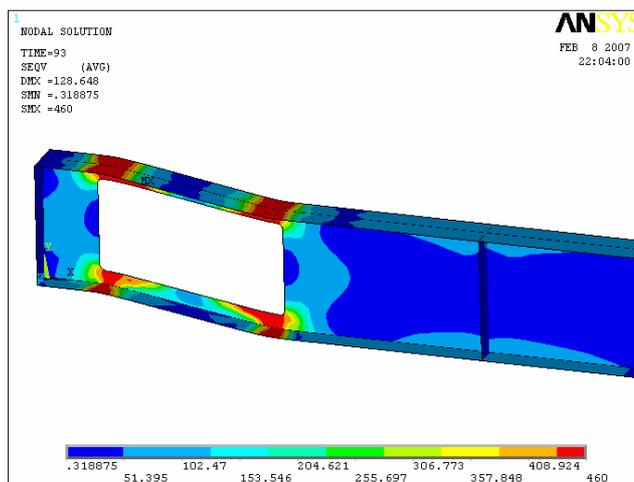


Figura 11. Tensões de Von Mises no instante da ruína (furo retangular)

Sabe-se que o arredondamento das bordas dos furos é extremamente importante para as vigas com furo retangular e quadrado na medida em que diminui o efeito de concentração de tensões e contribui para uma melhor redistribuição de esforços ao longo da alma das vigas de aço com aberturas. Na Figura 14 apresenta-se um gráfico da carga de ruína *versus* o raio de arredondamento das bordas dos furos (em função da espessura da alma). Pode-se notar da observação do gráfico que o arredondamento das bordas do furo foi bastante eficiente no que diz respeito ao aumento da carga de ruína da viga com furo retangular. Para uma viga com furo retangular (perfil IPE750) com altura de furo igual a 0,50H (vão de 6,0m), com arredondamento da borda do furo com um raio de concordância de cinco vezes a espessura da alma, houve um aumento da ordem de 9% na resistência, comprovando a eficácia deste detalhe de projeto na redistribuição de tensões na alma das vigas de aço.

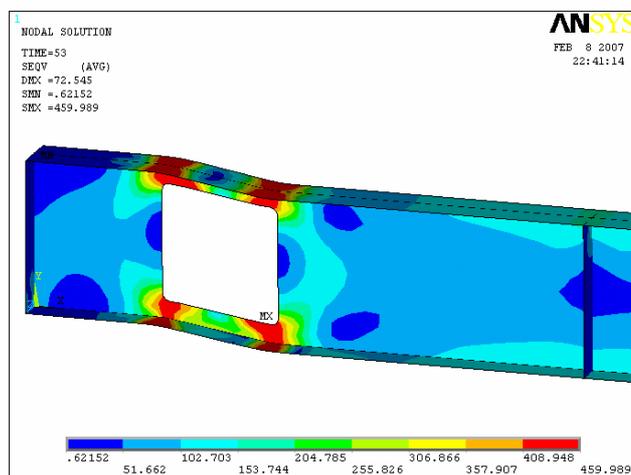


Figura 12. Tensões de Von Mises no instante da ruína (furo quadrado)

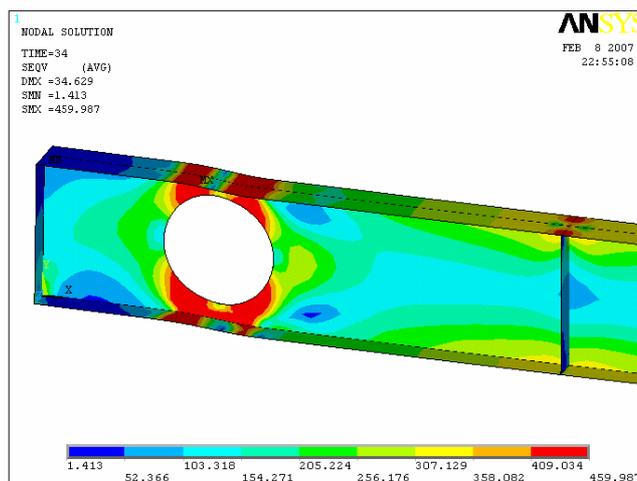


Figura 13. Tensões de Von Mises no instante da ruína (furo circular)

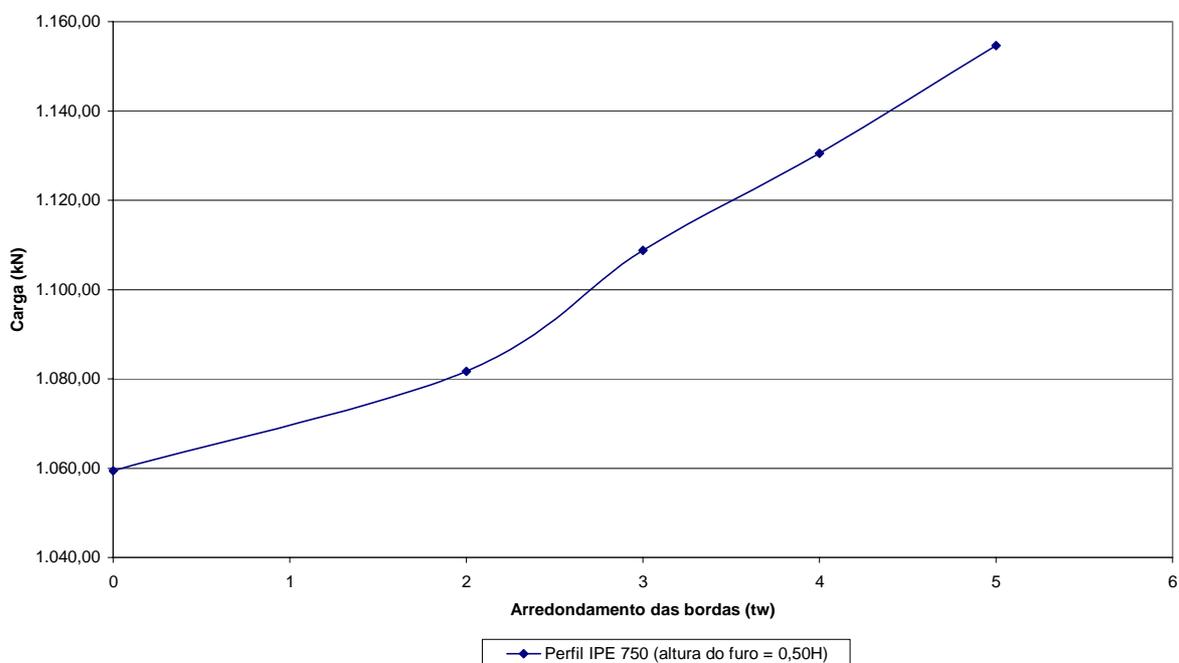


Figura 14. Curva da carga de ruína x arredondamento das bordas do furo retangular

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método dos elementos finitos demonstrou-se bastante útil e preciso na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma. A utilização deste método mostrou-se eficaz na previsão da distribuição de tensões, modos de colapso, deformada e carga de ruína.

Esta investigação mostrou que a eficiência estrutural das vigas com furos de geometria

circular é bastante superior às verificadas para as vigas com aberturas retangulares e quadradas, podendo ser da ordem de cinco e duas vezes e meia, respectivamente, para as vigas sem enrijecedores.

Provou-se que a utilização de cantos arredondados é bastante eficaz para uma melhor distribuição de esforços na alma das vigas de aço na medida em que diminui o efeito da concentração de tensões. O arredondamento das bordas de um furo retangular com um raio de concordância de cinco vezes a espessura da alma de uma viga (perfil IPE750) com furo de altura $0,50H$ (com um vão de 6,0m) incrementou a carga de ruína em cerca de 9%.

Para as vigas de aço que necessitam de furos na alma com dimensões consideráveis, por exemplo, no caso de alturas maiores do que 500 mm, sugere-se a utilização de enrijecedores longitudinais soldados na região da abertura.

A presença de enrijecedores longitudinais promove uma melhor distribuição de tensões no entorno dos furos, contribuindo, portanto, para um aumento no que tange a resistência das vigas. Etapas já desenvolvidas, no âmbito desta linha de pesquisa, mostraram que o uso destes enrijecedores pode duplicar ou até mesmo triplicar a carga de ruína de vigas de aço, com furos de 75% da altura da viga, para furos retangulares e quadrados, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] K.F. Chung, T.C.H. Liu e A.C.H. Ko, “Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings”, *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier, pp. 467-490, (2001).
- [2] K.F. Chung e R.M Lawson, “Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, pp. 135-163, (2001).
- [3] K.F. Chung, T.C.H. Liu e A.C.H. Ko, “Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve”, *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier, pp. 1177-1200, (2003).
- [4] R.G. Redwood e J.O. Mccutcheon, “Beam tests with un-reinforced web openings”, *J. Struct. Div. Proc.*, ASCE, 94 (ST1): 1-17, (1968).
- [5] F. Rodrigues. *Comportamento Estrutural de Vigas de Aço e Mistas com Aberturas na Alma*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 174 pgs, (2007).
- [6] ANSYS, Swanson Analysis Systems”, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, (2005).