

ANÁLISE NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE AÇO SUBMETIDAS A ABERTURAS NÃO PROJETADAS NA SEÇÃO DA ALMA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Victor Araújo Silva

*Discente, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(victoraraujsilva@hotmail.com)*

Eduardo Martins Toledo

*Professor Mestre, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(eduardomtoledo@gmail.com)*

Aurelio Caetano Feliciano

Professor Especialista, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis (aureliocfeng@gmail.com)

RESUMO

Abertura de furos na alma da viga de aço é frequentemente impostas à edificações de múltiplos pavimentos. Várias são as causas possíveis para efetuar tal diligência, dentre elas pode-se pontar: a limitação de altura das edificações imposta por regulamentos de zoneamento, considerações estéticas ou aspectos econômicos. Outro fator frequente está relacionado com a gestão da obra. O projeto estrutural de uma obra deve estar em consonância com os projetos complementares. O presente trabalho tem por objetivo avaliar e descrever o comportamento estrutural de vigas metálicas com aberturas circulares e quadrados em diferentes tamanhos e localidades. Por fim, apresenta-se uma análise numérica comparando as vigas sujeitas aos furos com uma viga de mesmo perfil, porém com a alma cheia. A metodologia aplicada para tal análise teve auxílio do método numérico dos elementos finitos.

PALAVRAS-CHAVE: Abertura na alma. Vigas de aço. Vigas metálicas; Análise em elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de fazer aberturas em vigas de aço é uma situação comum na construção civil, sendo ela planejada ou não, o que impõe ao profissional da engenharia civil conhecer o comportamento estrutural da viga quando submetida a aberturas ao longo de sua alma.

Entre os fatores que condicionam a intervenção de furos e aberturas em vigas de aço está a limitação de altura das edificações de múltiplos pavimentos exigida por regulamentos de zoneamento, aspectos econômicos ou considerações estéticas. O uso de um pé-direito alto para possibilitar a passagem de dutos e tubulações sob vigas metálicas conduz, não raramente, a alturas inaceitáveis entre pavimentos. Quando isso ocorre, é comum realizar a abertura na alma da viga. Contudo, é importante ressaltar que a abertura na alma da viga de aço pode ter um abalo considerável em sua resistência e rigidez, alterando seus modos de colapso e podendo necessitar de reforço especial. Tudo isso depende do tamanho, da forma geométrica e da localização dos furos. Para garantir que a resistência perdida com a influência da abertura seja recuperada, o reforço ao redor dos furos é constantemente utilizado. Mas é preciso considerar que o uso do reforço adicional poderá afetar o valor global da obra, o que requererá custos extras com despesas de soldagem e montagem implicada. Assim sendo, para não elevar o orçamento previsto e não atrasar o andamento da obra, o reforço deve ser evitado, sempre que possível. Para certificar se é ele necessário, devem ser avaliados os efeitos que as aberturas ocasionarão na viga.

Outro fator que leva à realização de abertura e furos está relacionado com a gestão da obra. O projeto estrutural de uma obra deve estar em consonância com os projetos complementares. Por isso, aferir a compatibilização desses projetos é importante para evitar intervenções na obra em andamento. Não havendo aferimento dos projetos, muitas vezes, torna-se necessário fazer intervenções na obra em andamento, com furos e aberturas em vigas, com o fim de abrir passagem para tubulações, eletrodos, eletrocalhas, dutos para ventilação, entre outros.

2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

“Dada a riqueza e complexidade do mundo físico, sempre se fica aquém ao querer entender e dominar a sua natureza. Quando se tenta prever o comportamento da realidade, recorre-se a uma simplificação dela, denominada modelo.” (UFPR, 2019)

O modelo tem como finalidade representar a realidade, admitindo uma gradação, variando sua qualidade ou deixando exatamente como ela é. Pode-se exemplificar de tal modo, ao realizar uma análise de um corpo sólido, pode-se ignorar os fenômenos elétricos, térmicos e magnéticos, admitindo que não interfiram no objetivo da análise. Omitindo-se destes, pode-se ou não considerar a deformação do corpo sólido, portando mutuamente a um modelo de sólidos deformável, ou a um corpo rígido. A escolha do modelo influencia diretamente na quantidade de fenômenos. (UFPR, 2019)

Até obter o modelo de elementos finitos, há uma cadeia de modelos apontada na Figura 1. O modelo físico leva em consideração a constituição do material, a geometria e a interação do corpo com o meio circundante. Essa etapa de modelamento identifica as leis físicas envolvidas e o grau de acurácia ou de complexidade destas leis na análise. No modelo matemático:

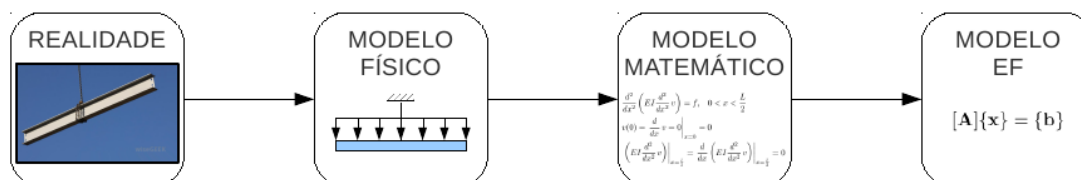
“fenômeno físico é representado por um problema a valores no contorno em que o sistema de equações diferenciais e as condições de contorno traduzem em

linguagem matemática o comportamento do fenômeno com base na geometria, na interação com o meio circundante e nas leis físicas nele implicadas.” (UFPR, 2019)

No modelo numérico é inserido o Método dos Elementos Finitos (MEF). Neste modelo a geometria em geral passa por simplificações e o sistema de equações diferenciais é solucionado através de um modelo numérico, onde é dada por um sistema de equações algébricas lineares. Caso emprega o MEF como método numérico, o sistema denominasse modelo de elementos finitos. A Figura 1 ilustra conexão de modelos na aplicação de um fato da mecânica dos sólidos. (UFPR, 2019)

Para o presente trabalho foi adotado o método dos elementos finitos.

Figura 1 - Sequência de modelagem



Fonte: UFPR, 2019

3 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA DO USO DO AÇO ESTRUTURAL

3.1 VANTAGENS

Bellei (2010) aponta que as principais vantagens do aço estrutura são: a capacidade de suportar grandes esforços a pesar a sua área das seções serem relativamente pequenas, proporciona uma grande margem de segurança no trabalho, permite a redução do prazo da construção, facilidade de desmontagem e substituição das peças e a possibilidade de reaproveitamento do material.

3.2 DESVANTAGENS

Pravia, Ficanha e Fabeane (2013) apontam como desvantagens do aço estrutural a alta probabilidade do custo ser mais alto quando comparado com outros métodos construtivos, necessidade de uma mão de obra qualificada, a dificuldade de encontrar material, necessidade da associação com outros matérias.

3.3 PERFIS LAMINADOS

Pravia et al. (2013) relatam que perfis laminados, assim como os produtos planos como as chapas, são provenientes da laminação a quente, conformados por uma sucessão de etapas. E que os perfis que se destacam são os perfis “W” e “U”, e as cantoneiras de abas iguais e desiguais. Segundo Pfeil e Pfeil (2012), esses perfis são de grande eficiência estrutural, e são fabricados em forma de H, I, C, L.

3.4 PERFIS SOLDADOS

Para Pfeil e Pfeil (2012), os perfis “são formados pela associação de chapas ou de perfis laminados simples, sendo a ligação, em geral, soldada.” Bellei (2010) traz esses perfis como de grande versatilidade, combinando espessura com alturas e larguras, dando ao projetista variadas opções de perfis e grande liberdade na hora de projetar.

3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO

O aço deve apresentar características físicas adequadas para que possa ser aplicado na engenharia. Com o aprimoramento do processo de fabricação, o aço usualmente apresenta essas características bem definidas, podendo definir os valores a seguir para projeto, de acordo com Bellei (2010):

- Massa específica $\rho = 7,85 \text{ t/m}^3 = 77,0 \text{ kN/m}^3$;
- Módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$;
- Coeficiente de Poisson no regime elástico $\nu = 0,3$;
- Coeficiente de Poisson no regime plástico $\nu_p = 0,3$;
- Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ por } ^\circ\text{C}$.

4 VIGA COM ABERTURA NA ALMA

Segundo Kripka (2011), viga é um elemento unidimensional, no qual uma de duas dimensões é predominante, podendo ser representado, simplesmente, por uma barra, coincidindo com o eixo do elemento. A ação predominante na viga é perpendicular à maior dimensão.

Pfeil e Pfeil (2012) afirmam que as vigas “[...] em forma de I são as mais funcionais, devendo, entretanto, seu emprego obedecer às limitações de flambagem.” Afirmam ainda que a seção ideal de uma viga é aquela com as áreas mais afastadas do eixo neutro, conseqüentemente, tendo a maior inércia no plano da flexão.

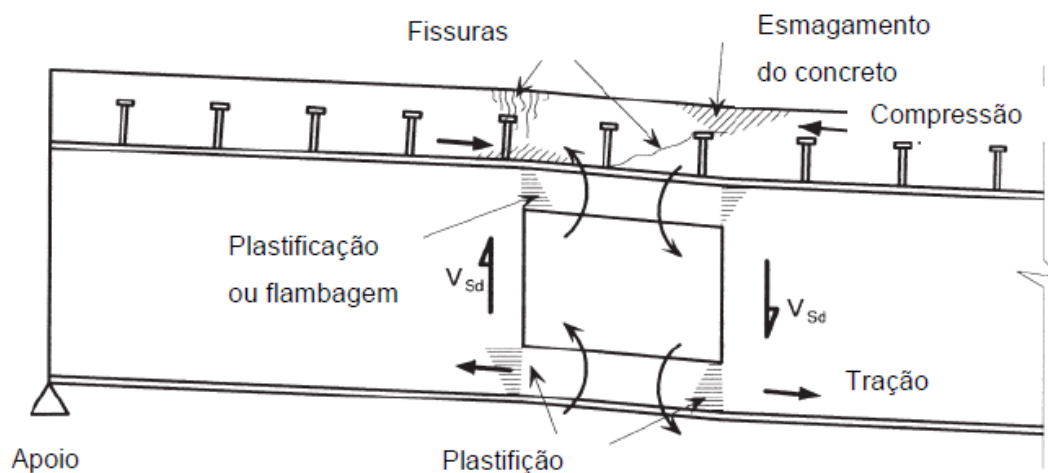
Mesmo o perfil I sendo o mais utilizado na construção civil, ainda possui outros perfis, como, por exemplo, a união de perfis U, menos comuns na prática.

4.1 VIGAS MISTAS

Conforme Pfeil e Pfeil (2012), viga mista é a associação de dois métodos construtivos, podendo ser um perfil metálico com uma laje de concreto, no qual esses elementos são ligados através de conectores mecânicos.

Rodrigues (2007) cita que as principais peças para resistir ao momento fletor aplicado sob uma viga mista com abertura retangular no decorrer de sua alma é o “T” inferior, pela sua força de tração, e a laje de concreto, através da força de compressão controlada pelas forças cisalhantes gerada pelos conectores. Com a aproximação da abertura aos apoios, o “T” superior desenvolve uma força de compressão, pois a força gerada pelos conectores é limitada. Já a força de cisalhamento é resistida principalmente pela alma do “T” superior, tendo uma participação da laje, visto que, o “T” inferior está resistindo a um alto estado de tensão. A resistência à dupla tração-compressão dependerá da quantidade de conectores acima do furo. Essa ação mista, geralmente, aumenta consideravelmente a resistência da viga à flexão local, permitindo utilizar maiores aberturas nas vigas mistas do que nas vigas de aço. Na Figura 1 representa os esforços atuantes ao redor da abertura, conforme dito acima.

Figura 2 - Esforços atuantes ao redor do furo



Fonte: RODRIGUES, 2007.

4.2 VIGAS SOLDADAS

As vigas soldadas, vigas constituídas por placas de aço, são outro modelo de viga que, assim como as vigas mistas, podem necessitar de aberturas no decorrer de sua alma.

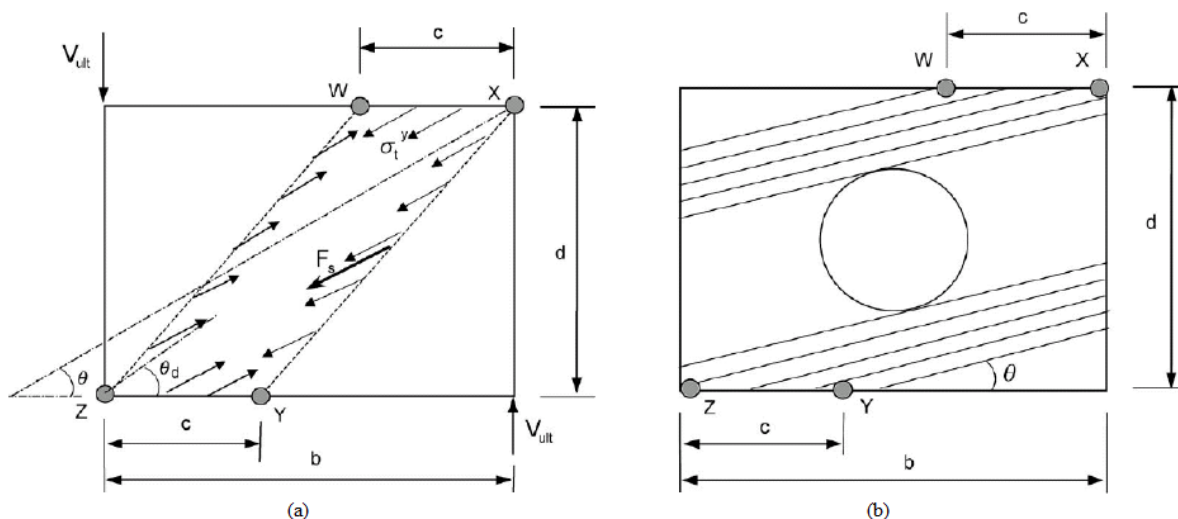
Em um estudo para analisar a esbeltez da alma e a rigidez das mesas das vigas soldadas contendo furos circulares e retangulares, mediante um modelo em elementos finitos, Rodrigues (2007) observou que, com o aumento da abertura, a carga de ruína decresce continuamente e que esse decréscimo é aproximadamente linear.

“Uma hipótese adicional feita para as equações de equilíbrio aproximadas é de que a largura da banda do campo de tração desenvolvido ao longo de uma banda diagonal, que suporta a carga aplicada no estágio pós-crítico, é reduzida pela maior dimensão do furo.” (RODRIGUES, 2007)

No estágio pós-crítico, a tensão de membrana concebida na alma da viga suporta as ações aplicada nela. Duas bandas de tração, uma acima e outra abaixo do furo, são formadas pela tensão de membrana como demonstra a Figura 2. Fenômeno este mencionando no trabalho do Rodrigues (2007). Parte do carregamento é suportado pelas mesas. A resistência ao momento fletor das mesas se iguala ao momento de plastificação, quando a viga está próxima de vir ao colapso. A colaboração da soma da rigidez das mesas com a carga suportada pela alma é o resultado da carga última da viga. Os parâmetros físicos mais importantes que afetam o comportamento desse tipo de viga são:

- Esbeltez da alma;
- Relação altura-largura da alma;
- Proporção do furo em relação à altura da viga;
- Rigidez das mesas;
- Rigidez dos “T’s” superior e inferior.

Figura 3 - Campo de tração de um painel (a) sem furo, (b) com furo



Fonte: RODRIGUES, 2007.

4.3 VIGAS DE AÇO

Segundo Rodrigues (2007), depois de uma avaliação do trabalho de Chung et al (2001) sobre mecanismo de *Vierendeel* em vigas de aço com aberturas circulares na alma, ele pode concluir que a resistência da viga está limitada pela formação de rótulas plásticas no “T” superior, no lado de menor momento da abertura. Porém, nem sempre esse é o motivo de colapso da viga. Enquanto não são formadas quatro rótulas plásticas em posições críticas no decorrer da seção da abertura, a viga é capaz de suportar as ações adicionais. Sendo assim, a existência de aberturas na alma da viga de aço permite três modos de ruína na seção perfurada:

- Falha por cisalhamento devido à capacidade reduzida ao cisalhamento;
- Falha por flexão devido à reduzida capacidade ao momento;
- Mecanismo de *Vierendeel*, devido à formação de quatro rótulas plásticas nos “T’s”, originária da transferência de cisalhamento ao longo da abertura.

As falhas, causadas por meio da flexão e do cisalhamento das seções com abertura, são controladas pela altura do furo na alma; já o comprimento do furo na alma controla o mecanismo de *Vierendeel*, que depende da flexão dos “T’s” superior e inferior e das resistências locais ao cisalhamento.

Para o presente trabalho foi adotado este tipo de viga, viga de aço ou viga laminada.

4.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Diferentemente do trabalho exercido pela viga de alma cheia, a alma é destinada a resistir ao cisalhamento e as mesas ao momento fletor, desprezando a contribuição das mesas na resistência ao cisalhamento. Na viga com uma grande seção perfurada na alma, a área da alma que é responsável por suportar ao cisalhamento é consideravelmente reduzida, assim tornando a área das mesas relevante no cálculo da capacidade de resistência ao cisalhamento da seção com a abertura (RODRIGUES, 2007).

Em seu trabalho, Rodrigues (2007) diz que “[...] as resistências ao cisalhamento das seções perfuradas apresentaram-se consistentemente maiores do que aquelas previstas pelas normas de dimensionamento correntes.”

Na Tabela 4 nota-se o aumento significativo que a área cisalhada das mesas contribui para a resistência ao cisalhamento da seção perfurada, podendo chegar a mais de 30% em seções com mesas espessas.

Tabela 1 - Aumento na resistência ao cisalhamento

Seções perfuradas	$d_0/h = 0.50$	$d_0/h = 0.67$	$d_0/h = 0.75$
UB 457 X 152 X	0,1	0,16	0,21
UB 457 X 152 X	0,22	0,33	0,43
UB 610 X 229 X	0,1	0,16	0,21
UB 610 X 229 X	0,18	0,27	0,36

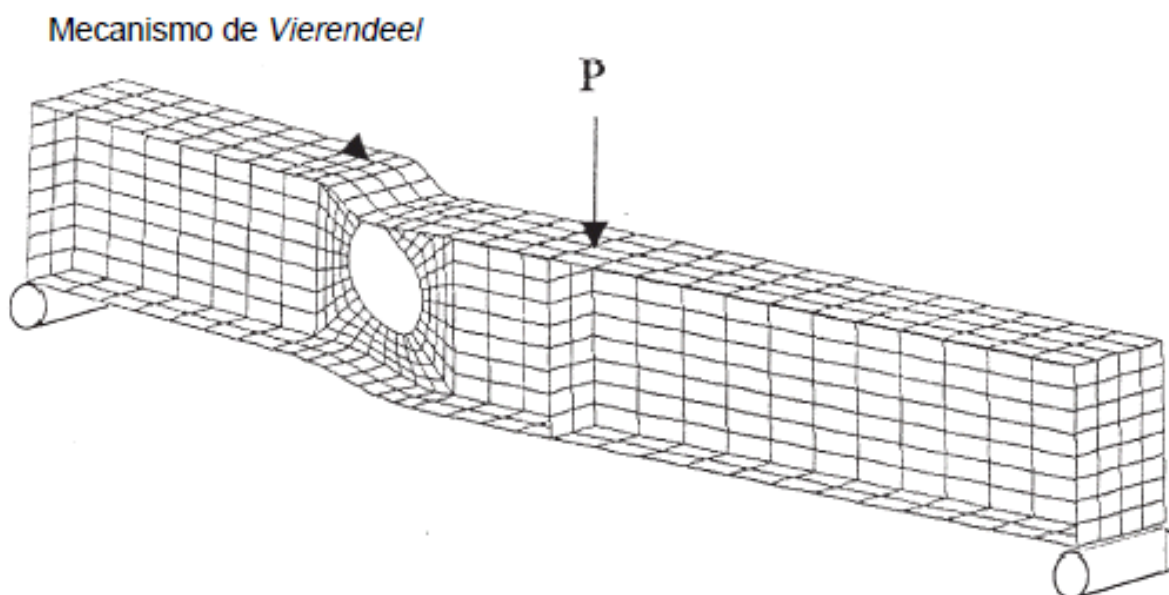
Fonte: RODRIGUES, 2007.

4.5 MECANISMO DE *VIERENDEEL*

Segundo Rodrigues (2007), o efeito do momento local de *Vierendeel* deve ser considerado logo após determinar a resistência cisalhante, notando que ambos atuam simultaneamente na seção da abertura, situação ilustrada na Figura 3. A interação na seção da abertura é bem complexa, sendo que, além de depender dos tamanhos e das formas das aberturas, depende das forças atuantes na peça.

Para Rodrigues (2007), “A relação de resistência dupla ao cisalhamento governa a resistência ao cisalhamento global de uma seção perfurada submetida simultaneamente à ruína por cisalhamento e por mecanismo de *Vierendeel* na ausência de momento global.”

Figura 4 - Viga submetida ao mecanismo de *Vierendeel*



Fonte: RODRIGUES, 2007, p. 107.

4.6 TENSÃO DE VON MISES

Tensão de *Von Mises* é um modo de falha especificado pelo início do escoamento. Hibbeler (2010) afirma que: “um material, quando deformado por uma carga externa, tende a armazenar energia internamente em todo seu volume.” Denominasse a energia por unidade de volume do material como densidade de energia de deformação.

4.7 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

A distribuição de tensões ao redor do furo na alma de uma viga resulta da forma e do tamanho do furo e da magnitude da relação momento cortante no centro do furo.

A força cortante atuante nos “T’s” superior e inferior gera tensões de flexão secundárias que alcançam valor máximo nas extremidades dos “T’s”. Para efeito de cálculo, essas tensões são somadas às tensões causadas pelo momento fletor aplicado na viga, alcançando assim as tensões de flexão totais. (VERÍSSIMO, 1996)

4.7.1 Aberturas circulares

De acordo com Veríssimo (1996), as tensões de cisalhamento octaédricas máximas, tensões que constituem o critério de escoamento sob tensões combinadas, nas proximidades da abertura circular ocorrem: no perímetro da abertura relacionado às tensões tangenciais ou nas fibras externas da alma na seção transversal que percorre pelo centro da abertura, relacionado às tensões combinadas de cisalhamento e flexão.

4.7.2 Aberturas retangulares

Veríssimo (1996) cita em sua tese que, através de uma análise utilizando a teoria da elasticidade, nas almas das vigas há uma distribuição de tensões de flexão não linear e, principalmente nos cantos, há uma elevada concentração de tensões ao longo do contorno da abertura. Apesar disso, o acúmulo de tensões se alivia rapidamente à medida que a distância transversal aumenta entre o ponto analisado e o furo. O acúmulo de tensões no canto do furo também se alivia rapidamente à medida que aumenta a distância longitudinal do canto. Já uma análise realizada pelo método de *Vierrendel* prevê uma divisão de tensões de flexão linear e não detecta os cúmulos de tensões.

4.8 ABERTURA EM ALMAS DE VIGAS NBR 8800/2008

A norma NBR 8800/2008 admite “a execução de aberturas circulares e sem reforço nas almas de vigas de aço biapoiadas, prismáticas, com seção em forma de I simétrica em relação ao eixo de menor inércia, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia”. A relação alma versus espessura admite-se no máximo $3,76\sqrt{E/f_y}$ e a mesa comprimida tenha uma relação largura versus espessura de no máximo $0,38\sqrt{E/f_y}$, não sendo necessário a utilização de cálculos específicos. Deve-se considerar os efeitos das aberturas, quando (Figura 9):

- “o carregamento atuante for uniformemente distribuído;
- as aberturas estiverem situadas dentro do terço médio da altura e nos dois quartos centrais do vão da viga;
- a distância entre os centros de duas aberturas adjacentes, medida paralelamente ao eixo longitudinal da viga, for no mínimo 2,5 vezes o diâmetro da maior dessas duas aberturas;

- a força cortante solicitante de cálculo nos apoios não for maior que 50% da força cortante resistente de cálculo da viga.” (NBR 8800/2018)

5 MODELO NUMÉRICO

5.1 ANSYS Inc.

ANSYS é o software líder global em simulações de engenharia, utilizando o método dos elementos finitos (FEM). As análises estruturais fundamentadas no método de elementos finitos, trazem benefícios em simulações de protótipos virtuais (CAD) para que as melhorias e as falhas do produto sejam constatadas antes mesmo da peça ser fabricada, substituindo o método de tentativa e erro em protótipos físicos. Outro ramo de aplicação desse metodologia é na análise de falhas e recuperação de equipamentos, no qual várias iterações e possibilidades são simuladas até que a condição ideal para a melhoria do equipamento seja alcançada.

A ANSYS está presente na criação de foguetes espaciais, carros, computadores, celulares, pontes e até mesmo em roupas tecnológicas. Ajuda as empresas mais inovadoras do mundo a entregar produtos mais sofisticados aos seus clientes. Oferece o melhor e mais amplo portfólio de engenharia de software de simulação, e ajuda essas empresas a desenvolver os mais complexos desafios de design e produtos da engenharia limitados apenas pela imaginação.

O ANSYS Workbench 19.2 foi o programa que auxiliou na realização do presente trabalho.

5.2 CARACTERÍSTICAS DO MODELO

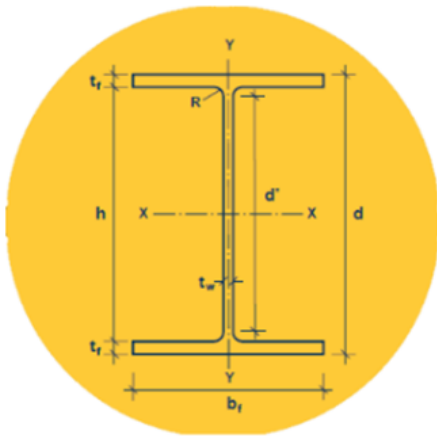
Os níveis das tensões de pico, quando um corpo elástico é sujeito a uma abertura, podem se tornar dezenas de vezes maior do que ocorreria caso o corpo não tivesse essa abertura. Fenômeno este denominado de concentração de tensões. Podendo ser estimado pela precisão das soluções aproximadas atingidos numericamente via Método dos Elementos Finitos.

A grande concentração de tensões obtida na periferia de uma abertura é de ampla importância prática. Quando uma chapa é fletida, uma tração ou compressão se produz, surgindo uma grande concentração de tensões nas aberturas. Sob os ciclos de tensões realizados pelos carregamentos, a fadiga nas partes sobrecarregadas pode provir fissuras de fadiga.

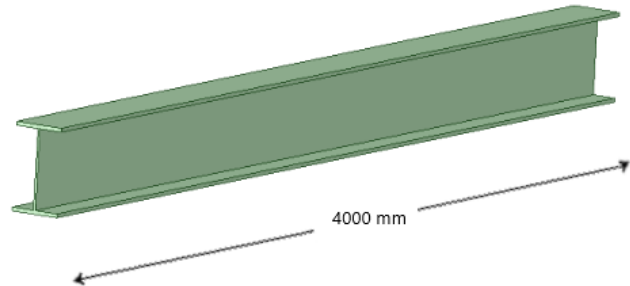
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O material de análise foi uma viga bi engastada de aço estrutural com módulo de 200.000 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3. O perfil utilizado foi o W 360 x 72,0, ilustrado na Figura 25, com um vão de quatro metros entre os apoios. Foi aplicada uma força unitária distribuída na mesa superior da viga.

Figura 5 - Dimensões do perfil



BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²
				t _f mm	t _w mm			
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3



Fonte: Autores.

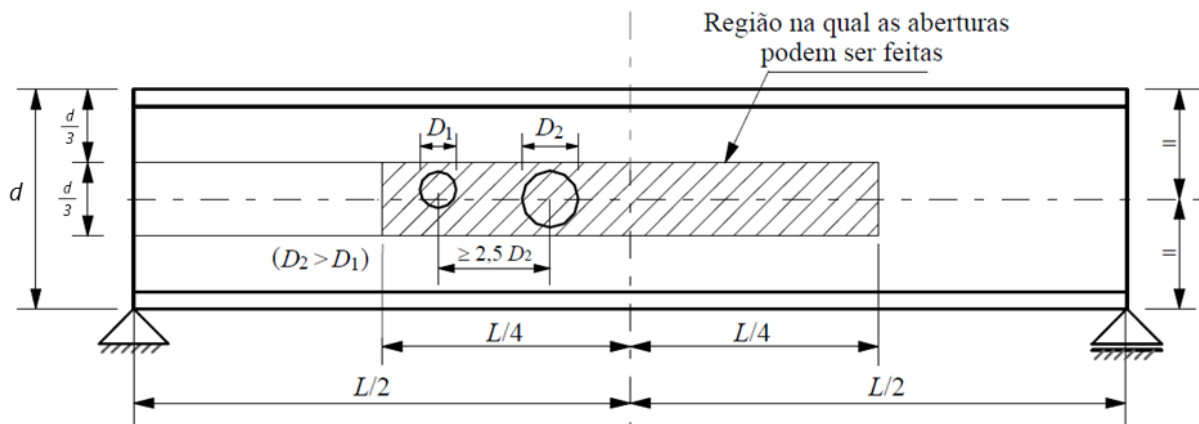
6.1 VIGAS COM ABERTURA

A análise do comportamento de vigas com abertura na alma, foi elaborada com base de análise em elementos finitos.

A Tabela 6, mostrará o resumo das análises feitas para o estudo das aberturas na alma das vigas de aço. Os critérios deste quadro são: altura do furo em função da altura do perfil (h) e a posição da abertura em função do comprimento da viga (L).

Como o número de modelos a serem analisados era grande, o critério utilizado para a escolha das amostras em elementos finitos foi baseado na NRB 8800:2008. No qual foi utilizada a região onde a abertura pode ser feita e o formato circular da abertura, conforme indicado na norma, Figura 5; modelos em que aberturas foram alocadas fora da região indicada pela norma e furos com medidas e formas diferente da indicada pela norma. E como base de comparação, foi modelado uma peça sem abertura.

Figura 6 - Região na qual aberturas podem ser feitas



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 2 - Quadro de resumo das análises

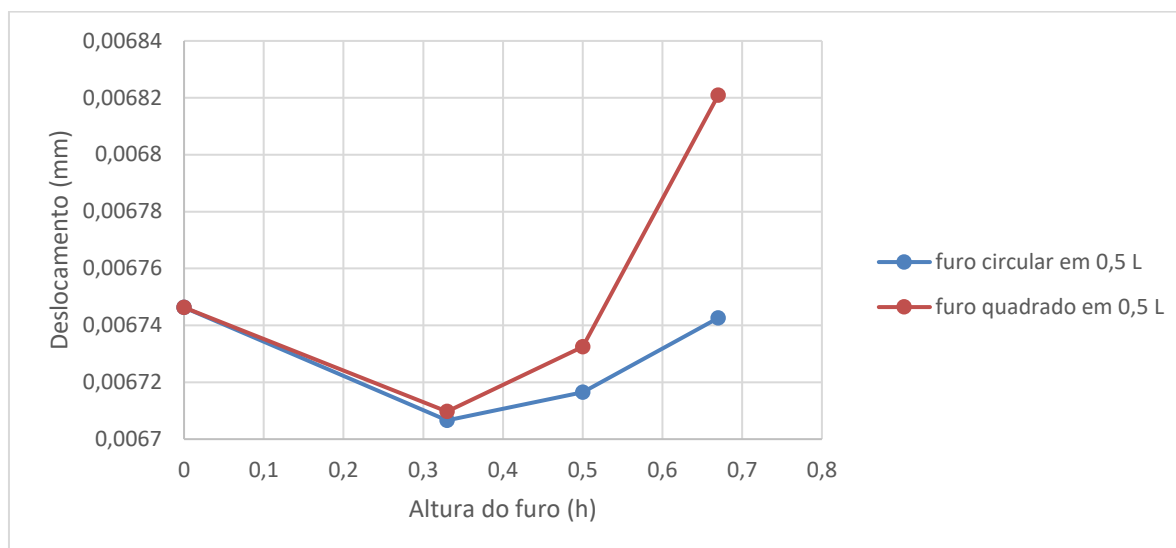
AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	POSIÇÃO DO FURO
1	-	-	-
2	0,33 h	-	0,5 L
3	-	0,33 h	0,5 L
4	0,5 h	-	0,5 L
5	-	0,5 h	0,5 L
6	0,67 h	-	0,5 L
7	-	0,67 h	0,5 L
8	0,33 h	-	0,75 L
9	-	0,33 h	0,75 L
10	0,5 h	-	0,75 L
11	-	0,5 h	0,75 L
12	0,67 h	-	0,75 L
13	-	0,67 h	0,75 L
14	0,33 h	-	0,875 L
15	-	0,33 h	0,875 L
16	0,5 h	-	0,875 L
17	-	0,5 h	0,875 L
18	0,67 h	-	0,875 L
19	-	0,67 h	0,875 L

Fonte: Autores.

A seguir será apresentado os resultados dos deslocamentos máximos e as tensões de *Von Mises* de cada modelo analisado. No qual tem-se que o deslocamento máximo é a deformação máxima da peça em relação ao eixo y, tendo assim, a maior flecha causa na viga. Já a tensão de *Von Mises* é um modo de falha especificado pelo início do escoamento.

Na Figura 7 será exibido gráfico dos deslocamentos máximos versus alturas dos furos, no qual estes se localizam no centroide das vigas. Pode-se notar dos gráficos que as vigas com aberturas circulares com diâmetros de 0,33 h, 0,5 h e 0,67 h tiveram um deslocamento menor quando se comparado com a viga de alma cheia. Já nas de aberturas quadradas de 0,33 h e 0,5 h tiveram um deslocamento menor do que a viga de alma cheia, porém maior do que as vigas com aberturas circulares com as mesmas dimensões. E a viga com abertura de 0,67 h teve um leve acréscimo em seu deslocamento comparada com a viga de alma cheia.

Figura 7 - Curvas do deslocamento máximo x altura do furo, furo em 0,5 L



Fonte: Autores.

A Tabela 3 apresenta a relação entre o deslocamento da alma cheia e os deslocamentos das vigas com aberturas no centroide da viga.

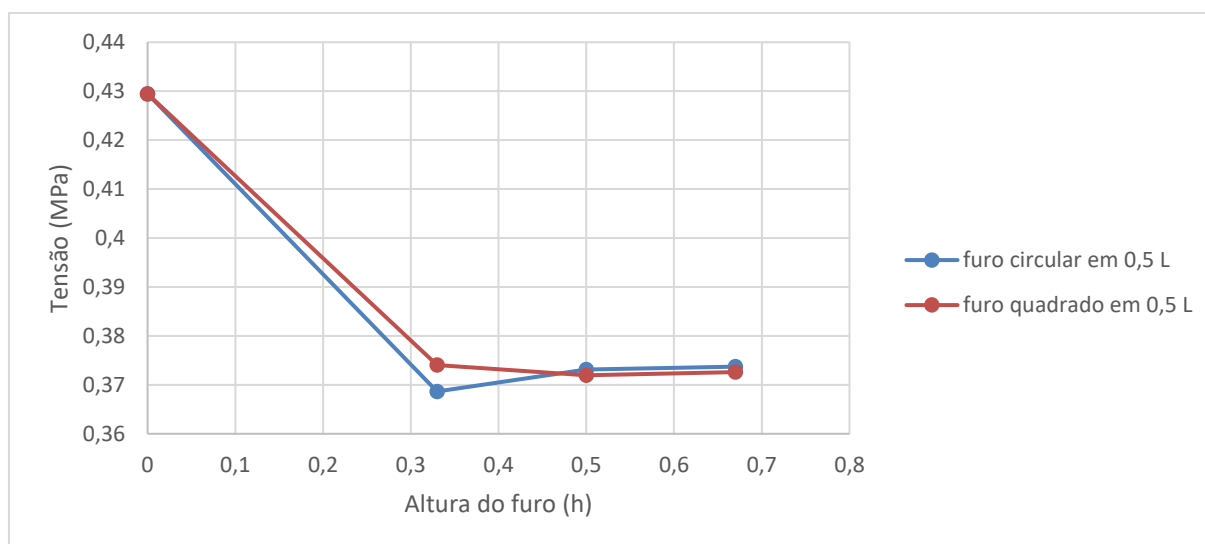
Tabela 3 - Relação entre deslocamento viga de alma cheia x deslocamento vigas com furos em 0,5 L

AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm)	RELAÇÃO (%)
1	-	-	0,0067463	0,00000
2	0,33 h	-	0,0067066	-0,58847
3	-	0,33 h	0,0067097	-0,54252
4	0,5 h	-	0,0067165	-0,44172
5	-	0,5 h	0,0067325	-0,20456
6	0,67 h	-	0,0067426	-0,05484
7	-	0,67 h	0,0068209	1,10579

Fonte: Autores.

Na Figura 8 será exibido o gráfico das tensões *Von Mises* versus a altura dos furos localizados a um metro e meio do centroide da viga. Nota-se um regresso na tensão *Von Mises* máxima, tanto nas vigas com aberturas circulares quanto nas com aberturas quadradas, quando comparadas com a viga de alma cheia. Pode-se notar também que nas vigas com aberturas de 0,5 h e 0,67 h sofrem uma maior tensão quando comparadas com as vigas com aberturas quadradas.

Figura 8 - Curvas da Tensão *Von Mises* máximo x altura do furo, furo em 0,5 L



Fonte: Autores.

Na Tabela 4 aponta-se as relações entre a tensão sofrida com a viga de alma cheia e as tensões sofridas nas demais vigas com furos localizados no centroide da viga.

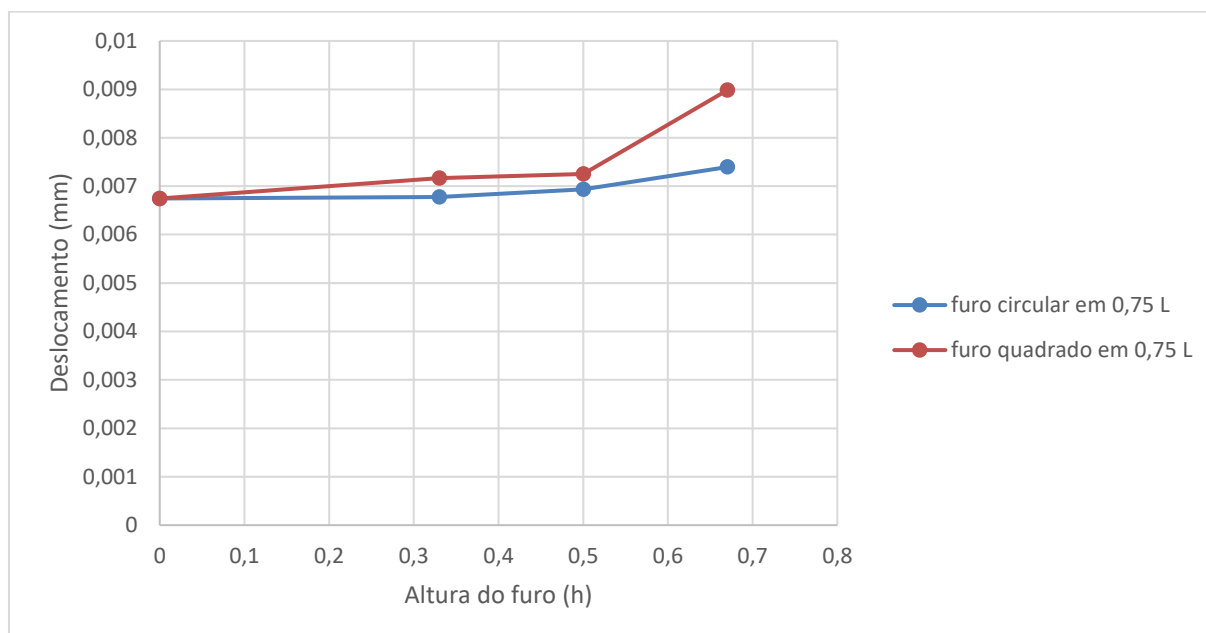
Tabela 4 - Relação entre tensão *Von Mises* da viga de alma cheia x tensões *Von Mises* das vigas com furos em 0,5 L

AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	TENSÃO <i>VON MISES</i> MÁXIMA (MPa)	RELAÇÃO (%)
1	-	-	0,42947	0,00000
2	0,33 h	-	0,36865	-14,16164
3	-	0,33 h	0,37404	-12,90661
4	0,5 h	-	0,37311	-13,12315
5	-	0,5 h	0,37196	-13,39092
6	0,67 h	-	0,37375	-12,97413
7	-	0,67 h	0,37261	-13,23957

Fonte: Autores.

Na Figura 9 será exibido gráfico dos deslocamentos máximos versus alturas dos furos, no qual estes se localizam a um metro do centróide da viga. Da observação dos gráficos pode-se notar que as vigas com aberturas circulares de 0,33 h e 0,5 h sofrem um deslocamento minimamente maior quando comparado com a viga de alma cheia, sendo que as vigas com aberturas quadradas de 0,33 h e 0,5 h sofrem um deslocamento praticamente contínuo, porém mais alto que as vigas com abertura circulares e, conseqüentemente, maior que a viga de alma cheia. A viga com abertura circular de 0,67 h sofre um deslocamento um pouco mais alto do que a de alma cheia, já a relação entre o deslocamento da viga de alma cheia com a viga de abertura quadrada de 0,67 h, começa uma variação mais acentuada.

Figura 9 - Curvas do deslocamento máximo x altura do furo, furo em 0,75 L



Fonte: Autores.

Na Tabela 5 serão exibidos a relação deslocamento da viga de alma cheia com as vigas apontadas na Figura 9.

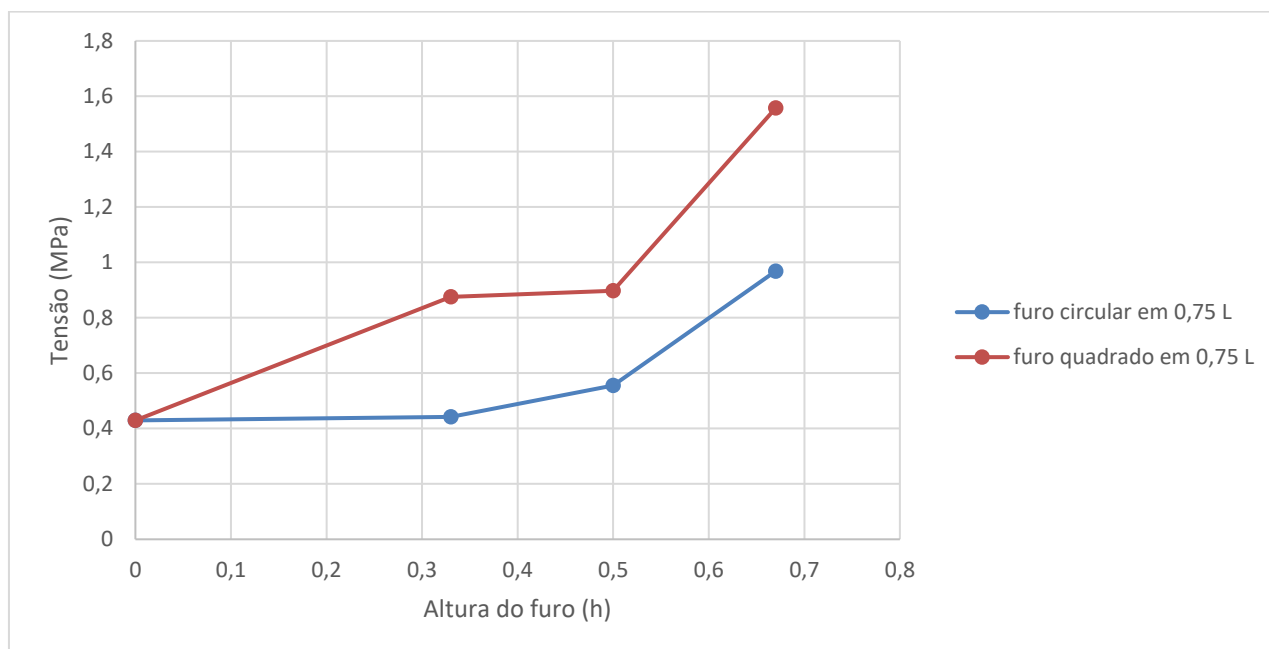
Tabela 5 - Proporção entre deslocamento viga de alma cheia x deslocamento vigas com furos em 0,75 L

AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm)	RELAÇÃO (%)
1	-	-	0,0067463	0,00000
8	0,33 h	-	0,0067754	0,43135
9	-	0,33 h	0,0071663	6,22563
10	0,5 h	-	0,0069378	2,83859
11	-	0,5 h	0,0072507	7,47669
12	0,67 h	-	0,0073948	9,61268
13	-	0,67 h	0,0089815	33,13224

Fonte: Autores.

Na Figura 10 será exibido gráfico das tensões *Von Mises* máximas versus alturas dos furos, no qual estes se localizam a um metro do centróide da viga. Da observação dos gráficos pode-se notar que a viga submetida a uma abertura circular de 0,33 h teve um pequeno acréscimo de tensão comparado com a viga de alma cheia. Ainda comparando viga de alma cheia com as demias, nota-se que há um grande aumento no acúmulo de tensão quando aumenta o tamanho da abertura, e principalmente quando varia de furo circular para furo quadrado.

Figura 10 - Curvas da Tensão *Von Mises* máximo x altura do furo, furo em 0,75 L



Fonte: Autores.

Nota-se relação entre a tensão *Von Mises* da viga de alma cheia e as tensões *Von Mises* das vigas com furos em 0,75 L na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre tensão *Von Mises* da viga de alma cheia x tensões *Von Mises* das vigas com furos em 0,75 L

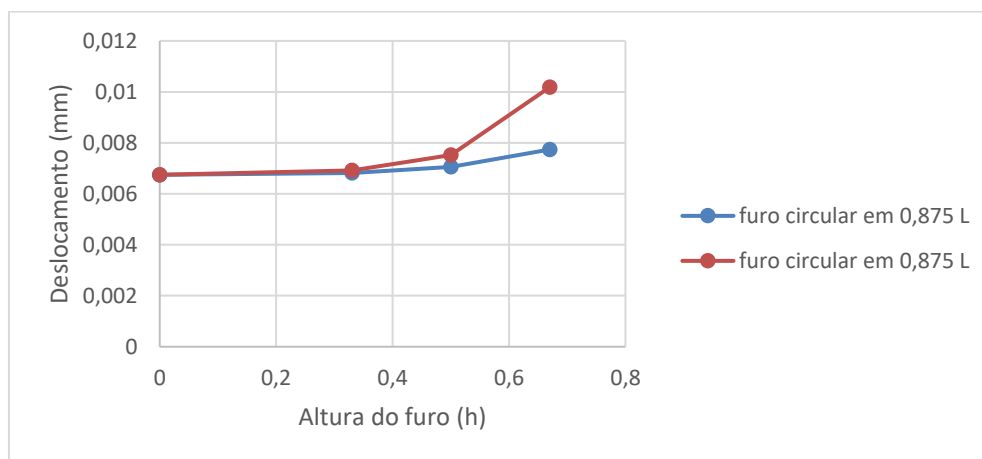
AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	TENSÃO VON MISES MÁXIMA (MPa)	RELAÇÃO (%)
1	-	-	0,42947	0,00000
8	0,33 h	-	0,4426	3,05726
9	-	0,33 h	0,87517	103,77908
10	0,5 h	-	0,555	29,22905
11	-	0,5 h	0,89714	108,89468
12	0,67 h	-	0,96853	125,51750
13	-	0,67 h	1,5572	262,58644

Fonte: Autores.

Na Figura 11 será exibido gráfico dos deslocamentos máximos versus alturas dos furos localizados a um metro e meia do centróide da viga. Observa-se no gráfico que há pouca variação no deslocamento quando a viga é submetida a aberturas, tanto circulares quanto quadradas, de 0,33 h e na viga com abertura circular de 0,5h, comparando com a viga de alma cheia. Nas vigas com furo circular de 0,67h e quadrado de 0,5h, temos um aumento um pouco mais alto em relação a viga com alma cheia. Já na viga com furo quadrado de 0,67 h temos o pico de deformação em relação a todas outras modeladas.

Na Tabela 7 tem-se a relação entre o deslocamento máximo da viga de alma cheia e as vigas com aberturas em 0,875 L.

Figura 11 - Curvas do deslocamento máximo x altura do furo, furo em 0,875 L



Fonte: Autores.

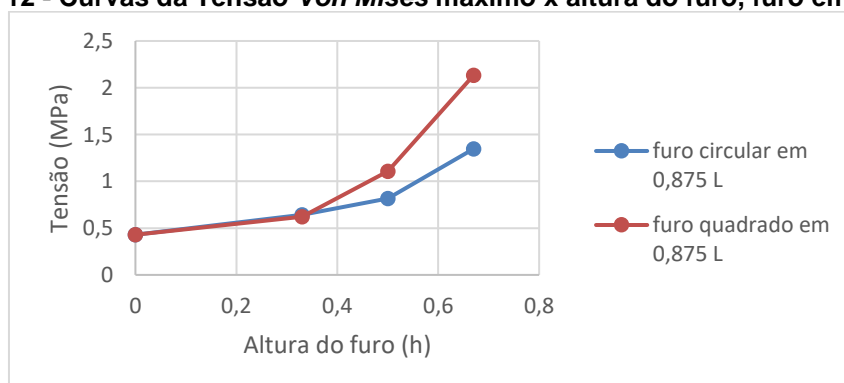
Tabela 7 - Proporção entre deslocamento viga de alma cheia x deslocamento vigas com furos em 0,875 L

AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm)	RELAÇÃO (%)
1	-	-	0,0067463	0,00000
14	0,33 h	-	0,0068157	1,02871
15	-	0,33 h	0,0069182	2,54806
16	0,5 h	-	0,0070568	4,60252
17	-	0,5 h	0,0075165	11,41663
18	0,67 h	-	0,0077377	14,69546
19	-	0,67 h	0,010185	50,97164

Fonte: Autores.

Na Figura 12 será exibido gráfico das tensões *Von Mises* máximas versus alturas dos furos localizados a um metro e meio do centróide da viga. Da observação dos gráficos pode-se notar que há um grande acúmulo de tensão nas vigas submetidas a aberturas localizadas nessa região, sendo que, essa tensão aumenta cada vez mais com o aumento da altura do furo e quando o furo é de forma quadrada.

Figura 12 - Curvas da Tensão *Von Mises* máximo x altura do furo, furo em 0,875 L



Fonte: Autores.

Na Tabela 8 tem-se a relação entre a tensão *Von Mises* máxima da viga de alma cheia e as vigas com aberturas em 0,875 L.

Tabela 8 - Relação entre tensão *Von Mises* da viga de alma cheia x tensões *Von Mises* das vigas com furos em 0,875 L

AMOSTRA	Ø FURO CIRCULAR	ALTURA FURO QUADRADO	TENSÃO VON MISES MÁXIMA	RELAÇÃO (%)
1	-	-	0,42947	0,00000
14	0,33 h	-	0,64172	49,42138
15	-	0,33 h	0,62037	44,45014
16	0,5 h	-	0,81628	90,06683
17	-	0,5 h	1,107	157,75956
18	0,67 h	-	1,3467	213,57254
19	-	0,67 h	2,1329	396,63539

Fonte: Autores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método numérico dos elementos finitos comprovou-se bastante preciso e útil na estimativa do comportamento estrutural de vigas metálicas com furos na alma.

Foi apurado neste trabalho que as vigas de perfil W 360 x 72 sujeitas a aberturas circulares e quadradas em seu centróide com dimensões de 0,33 h, 0,5 h e 0,67 h e vão de 4,0 metros, tem uma perda no acúmulo de tensões internas, tensão *Von Mises*; e apenas na viga sujeita a abertura quadrada em 0,67 h, neste caso, haverá um leve aumento em sua flecha, sendo que nas outras a uma diminuição na flecha. Podendo assim afirmar que a abertura no centróide da viga, muita das vezes, pode ser favorável, podendo ser utilizadas para vencer maiores vãos ou para diminuir a seção transversal de perfis.

Para vigas constituídas pelo perfil W 360 x 72, com alturas de furos igual a 0,33 h, 0,5 h e 0,67 h, localizados a 0,5 L e 0,875 L e vão de 4,0 metros, observou-se que o tipo e tamanho do furo altera significativamente tensão *Von Mises*. Como era de se esperar, as vigas com furo quadrado são as com maiores concentrações de tensão internas, podendo chegar a um acréscimo de aproximadamente 400% quando comparadas com a viga de alma cheia. Podendo observar a concentração das tensões *Von Mises* máximas nos cantos dos furos, podendo vir a formações de rótulas nestes pontos e conseqüentemente a ruptura pela formação do mecanismo de *Vierendeel*.

Pode-se concluir ainda que o aumento do furo e a sua localização aumenta a deformação em y, flecha. Contudo, para as vigas W 360 x 72 com vão de 4,0 metros e abertura circular de 0,33 h, 0,5 h e 0,67 h localizadas em 0,75 L e 0,875 L, tem uma variação no aumento de sua flecha de 0,4% à 14,7% quando comparadas com a viga de alma cheia. Já para vigas com mesmo perfil e vão sujeitas a abertura quadrada de 0,33 h, 0,5 h e 0,67 h em 0,75 L e 0,875 L, como era de se esperar, possui uma aumento ainda maior em suas flechas variando seu acréscimo em 6,2% até 51% quando comparadas a viga de alma cheia.

Sendo assim, as aberturas realizadas para passagens de tubulações, eletrodos, eletrocalhas, dutos para ventilação, entre outros motivos, pode sim influenciar na resistência da peça, dependendo do localdo, do tipo e do tamanho da abertura. Sabendo que o local mais seguro para serem executados é no centro da alma, conforme a NBR 8800/2008.

REFERÊNCIAS

ANSYS Inc. <<https://www.ansys.com/about-ansys>>. Acesso em: 13 abr. 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. Rio de Janeiro: Abnt, 2008

BELLEI, I. H.. **Edifícios industriais em aço**: projeto e cálculo. ed. ver. e ampl. São Paulo, 2010.

KRIPKA, M.. **Análise estrutural para engenharia civil e arquitetura**: estruturas isostáticas. 2. ed. São Paulo: Pini, 2011.

HECKE, M. B.. **Método dos Elementos Finitos Aplicados à Engenharia de Estruturas**: Estado Plano De Tensão - Concentração de Tensões ao Redor de Orifícios. 2010. 22 f. - Curso de Estruturas, UFPR, Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://www.estruturas.ufpr.br/disciplinas/graduacao/metodo-dos-elementos-finitos-aplicados-a-engenharia-de-estruturas/material/>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

HIBBELER, R. C.. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

NEVES, O. R.; CAMISASCA, M. M.. **Aço Brasil**: uma viagem pela indústria do aço Belo Horizonte: Escritório de Histórias, 2013. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/files/LIVRO_ACO_BX.pdf>. Acesso em: 25 out 2018.

PFEIL, W. M. C.; PFEIL, M. M.. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático segundo a NBR 8800:2008. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

PRAVIA, Z. M. C.; FICANHA, F.; FABEANE, R.. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**: edifícios industriais detalhado. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

RODRIGUES, F.. **Comportamento Estrutural de Vigas de Aço com Abertura na Alma**. 2007. Dissertação de Mestrado. FEN/UERJ, Mestrado, PGECIV - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, V. P.; PANNONI, F. D.. **Estruturas de aço para edifícios**: aspectos tecnológicos e de concepção. São Paulo: Blucher, 2010.

UFPR, Universidade Federal de Paraná. **O método dos elementos finitos**. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM266/Apostila/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20MEF.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

VERÍSSIMO, G. S.. **Análise e comportamento de vigas de aço e vigas mistas com aberturas na alma, Belo Horizonte**, 1996, 265p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.