



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGA METÁLICA COM ABERTURAS NA ALMA POR MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

SANTOS, LEONARDO MADEIRA DOS

leonardo._.engenharia@live.com

Universidade de Brasília

Goiás, Aparecida de Goiânia, Brasil.

RIBEIRO NETO, JULIANO GERALDO

julianogeraldo.eng@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Goiás, Goiânia, Brasil

SANTOS, SÉRGIO BOTASSI DOS

sergio_botassi@yahoo.com.br

Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Goiás, Goiânia, Brasil

Resumo. *Este trabalho consiste em analisar o comportamento de viga de aço com perfil I, biapoiada, sujeita a diferentes casos de aberturas retangulares e circulares na alma sem a presença de reforços na região das aberturas. Foi realizada a simulação computacional de sete modelos, com o objetivo de avaliar a influência da abertura na alma no comportamento estrutural da viga. Foram três modelos com aberturas circulares e três com retangulares e um modelo sem abertura o qual é adotado como referência. As aberturas estão dispostas em uma mesma posição em relação ao comprimento, variando sua posição em relação à altura da viga. Comparações com a NBR 8800 (ABNT, 2008) e com os textos de interesse citados no Anexo S da referida norma foram realizadas com o modelo computacional para verificar se os limites estabelecidos na literatura são ou não conservadores. Foi verificada uma maior influência das aberturas retangulares na distribuição de tensões, chegando a acréscimos de 40 % para o mesmo nível de carregamento.*

Palavras-chave: *Viga de aço, aberturas retangulares ou circulares, reforços, modelo computacional.*

1 INTRODUÇÃO

A busca de racionalização do espaço em edifícios de múltiplos pavimentos, que implica em diversos casos na redução da altura total da edificação, é crescente. Os motivos deste fenômeno se dão, dentre outros, por códigos de edificações e de zoneamento urbano, fatores econômicos e estéticos. Nesta situação, uma solução estrutural efetiva é a abertura na alma de vigas, para passagem de elementos pertinentes aos projetos complementares (elétrico, hidrossanitário, gás, incêndio, rede de dados, etc.). No caso de estruturas de aço e/ou mistas, é usual o emprego do perfil I simétrico em relação ao eixo de menor inércia para as vigas. Em relação à geometria das aberturas, as formas usuais são: circular, retangular e quadrática. Entretanto, outros formatos podem ser empregados, conforme a necessidade de projeto. A Figura 1 demonstra a eficiência em aproveitamento de espaço aliada a integração de serviços que furos na alma de vigas de aço podem proporcionar. O presente trabalho tem por objetivo avaliar, por meio de simulação numérica computacional, o comportamento estrutural de vigas de aço com presença de aberturas nas almas.



Figura 1 – Integração de serviços por meio de vigas de aço celulares. Fonte: Ediliziainrete (2016).

2 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

A NBR 8800 (ABNT, 2008) fornece procedimentos simplificados que não requerem cálculos complexos para realização de aberturas em almas de vigas de aço e mistas, onde não há necessidade de reforço. Esses procedimentos são relativos a vigas em formato de I em relação ao menor momento de inércia com aberturas circulares, limitadas dentro do terço médio da altura e dos dois quartos centrais do vão da viga. Como critério adicional o espaçamento entre centros de aberturas é limitado a 2,5 vezes o diâmetro do maior furo, sendo que este método não contempla vigas com inércia variável. A Figura 2 ilustra de forma geral a aplicação desses critérios.

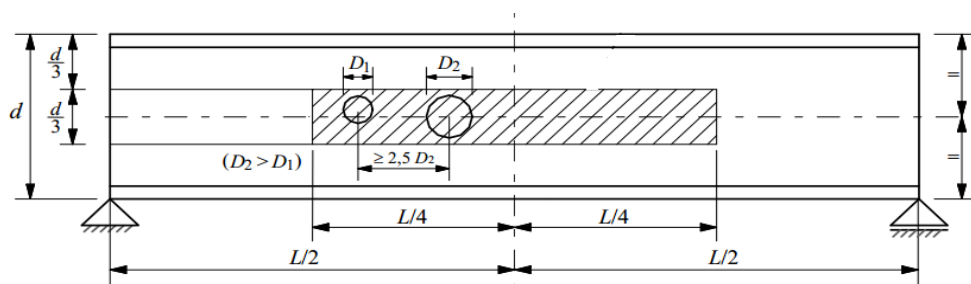


Figura 2 – Quesitos geométricos de aberturas circulares - vigas de aço. Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Na Figura 2, a área hachurada representa a zona neutra da seção, sendo limitada à altura de 1/3 (um terço) do perfil, que é a máxima altura que uma abertura poderá ter. A zona neutra pode ser entendida como a região da alma da viga na qual uma abertura com determinadas características, sem reforços, tenha influência desprezível nas capacidades resistentes à força cortante e ao momento fletor, conforme descrevem Veríssimo *et al* (2012). Entretanto, o AISC (2003) limitando a altura da abertura (h_0) em 70% da altura do elemento estabelece então uma maior altura da zona neutra. A partir da definição recomenda-se, portanto, que a zona neutra deve abranger toda a dimensão da abertura. Sendo, de acordo com o AISC (2003) $h_0/d \leq 0,7$, entretanto a altura do Tê superior (s_t), e/ou do Tê inferior (s_b) – ver Fig. 3 –, deve ser maior ou igual a $0,15 d$ para vigas de aço não mistas (aço e concreto), independentemente da excentricidade do furo em relação à linha que passa pelo centroide da seção, sendo d a altura do perfil. Na pior das situações, o AISC (2003) também estabelece que a razão a_0/h_0 não seja maior que 3, em que a_0 é o comprimento da abertura. A Figura 3 esclarece a representação dos "Tês" superior e inferior em vigas de seção I com aberturas usuais.

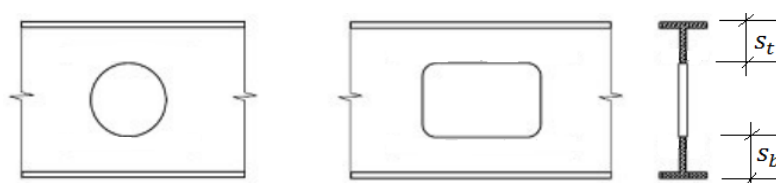


Figura 3 – Representação dos Tês superior e inferior em viga I com abertura circular ou retangular.

De acordo com Redwood e Shrivastava (1980) *apud* Veríssimo (1996) aberturas circulares tem um comportamento melhor do que as retangulares de dimensões similares. A abertura de geometria retangular apresenta altas concentrações de tensões ao longo dos contornos das aberturas, entretanto as concentrações de tensões reduzem rapidamente à medida que aumenta a distância transversal entre o ponto de análise e a abertura. Para minimizar os efeitos das concentrações de tensão nos cantos das aberturas retangulares Lawson e Hicks (2011) recomendam que seja adotado para o raio desses cantos o maior valor dado por $2t_w$ ou 15 mm.

O AISC (2003) recomenda que a distância da borda da abertura até o apoio não deve ser menor do que a altura d do perfil, e Lawson e Hicks (2011) afirmam necessário que a distância da borda da abertura ao apoio tem que ser também maior ou igual a a_0 . Entretanto, levar em conta o tipo de apoio das extremidades da viga é relevante. De acordo com Veríssimo *et al* (2012) aberturas com centroides coincidentes com o centroide do perfil são as mais recomendadas, contudo aberturas com excentricidades são também utilizadas, como por exemplo, em casos em que é necessário se ter determinada inclinação da tubulação hidrossanitária, ou quando se tem mais de um serviço atravessando a estrutura.

Na região da abertura ocorre a não validade do Princípio de *Saint Venant* que assegura a aplicação das equações básicas da resistência dos materiais - que permitem o cálculo da tensão normal devido a um carregamento axial, da tensão cisalhante devido à torção e da tensão de flexão devido a dobramento- somente em regiões onde não ocorram pontos de aplicação de carga ou enquanto a seção transversal do elemento for relativamente uniforme, i.e., não ocorrerem mudanças abruptas da seção transversal conforme relata Craig Jr. (2011). Portanto, de acordo com Castro (2009) *apud* Pacheco (2013) as equações “clássicas” não consideram os efeitos das variações bruscas de seção e servem apenas para calcular as tensões nominais.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição do modelo

Os casos analisados foram modelados com base em uma adaptação do exemplo 4.2 de Bellei *et al.* (2008). O modelo trata de uma viga simplesmente apoiada em suas extremidades, com vão de 12,0 m e presença de aberturas retangulares ou circulares de tamanho fixo em diferentes posições com relação à altura do perfil em cada caso.

Para a viga simulada foi adotado o perfil W 530 x 82 com enrijecedores de apoio de 8,0 mm de espessura, conforme apresentado na Figura 5. As propriedades mecânicas do aço utilizado são: densidade 7850 kg/m³; coeficiente de Poisson 0,3; módulo de Young 200 GPa; limite de escoamento 250 MPa e limite de ruptura 400 MPa.

Como critério de carregamento foi aplicada uma pressão de 150 kN/m² na face superior da mesa da viga, sendo este valor obtido com a finalidade de alcançar a plastificação da estrutura. Sendo a largura da mesa de 209 mm, esta tensão corresponde a uma carga de 31,35 kN/m.

3.2 Modelagem numérica

Foi utilizado para a modelagem e análise por elementos finitos o software ABAQUS™. Os efeitos de não linearidade geométrica foram incorporados ao modelo pelo comando NLGEOM (abreviação para Não Linearidade Geométrica). O fato de o *software* considerar os efeitos de não linearidade geométrica é importante em casos onde o efeito das cargas no modelo resultem em grandes deslocamentos e para representar adequadamente a redistribuição de tensões ao longo da abertura de acordo com Hibbitt, Karlsson & Sorensen (2000).

A estrutura analisada foi modelada com o elemento S4R tanto para a viga, quanto para os enrijecedores de apoio, nas regiões de vizinhança de abertura foi utilizado o elemento S3. O elemento S4R denotado por elemento de placa com dupla curvatura ou elemento de casca compacto (*thickshell*) apresenta as seguintes propriedades: integração reduzida, controle de *hourglass* (degeneração do modo de deformação da malha de elementos finitos), deflexões pequenas e deformações infinitesimais, elemento tridimensional com 4 nós e 6 graus de liberdade em cada nó. O elemento S3 é um elemento shell triangular com 3 nós que providencia acurácia nos resultados em várias situações de carregamento desde que o refinamento da malha seja suficientemente alto. A Figura 4 apresenta a geometria e as tensões resultantes atuantes em uma placa ou elemento shell que obedece a teoria de dupla curvatura.

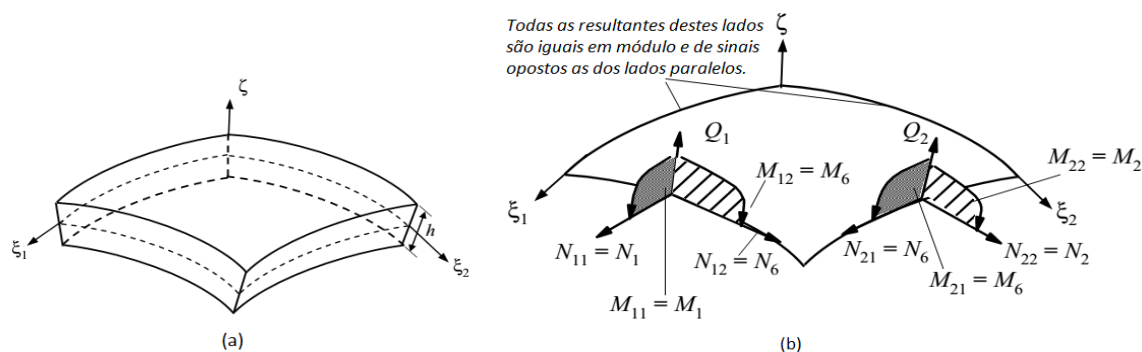


Figura 4 - Tensões resultantes agindo em uma placa ou elemento *shell* (a) Geometria do elemento *shell*, e (b) Forças e momentos por unidade de comprimento. Fonte: Adaptado de Reddy (2004).

Em vigas desse tipo dispostas como vigas de piso de edificações a mesa comprimida do perfil de aço na maioria das vezes tem seu deslocamento lateral impedido por laje de concreto ou por outro componente estrutural equivalente, logo a FLT – Flambagem Lateral com Torção – não será analisada neste estudo.

A Figura 5 apresenta o modelo adotado para a viga com enrijecedores transversais nos apoios, bem como as condições de contorno como o carregamento aplicado. A Figura 6 apresenta a disposição da malha na região da abertura circular.

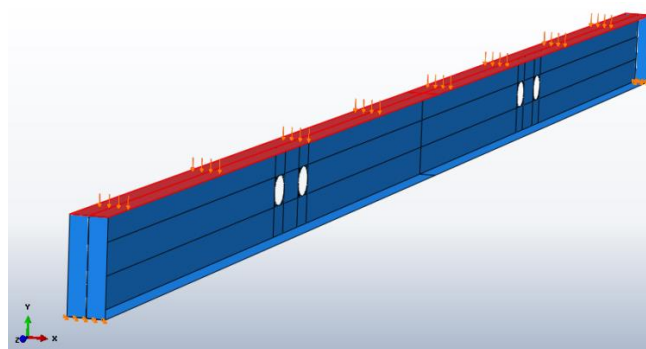


Figura 5 – Viga biapoada com furos na alma e enrijecedores de apoio

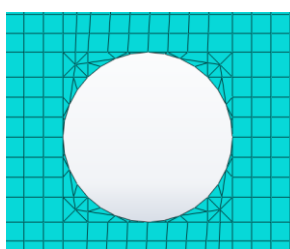


Figura 6 – Malha na região da abertura

O diâmetro das aberturas circulares e a dimensão da aresta das aberturas quadradas é de 176 mm o que equivale a $1/3$ da altura da viga (d). A disposição das aberturas em relação ao comprimento da viga é constante. Em relação à altura do perfil a posição da abertura varia na direção positiva, portanto, o Tê superior tem diferentes quantidades de material. Sendo s_t a altura do Tê superior, e d a altura total do perfil têm-se as seguintes relações para os modelos analisados apresentadas na Tab. 1. As vigas 1 a 3 possuem abertura circular, e as vigas 4 a 6 abertura quadrada. Um modelo de viga sem aberturas foi avaliado para comparação de resultados com os modelos com abertura, esse modelo é designado neste estudo por V_0 .

Tabela 1 – Altura dos Tês superiores para os modelos analisados.

Vigas	s_t	Vigas	s_t
V1	$0,33 d$	V4	$0,33 d$
V2	$0,15 d$	V5	$0,15 d$
V3	$0,10 d$	V6	$0,10 d$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para padronizar a análise de resultados, foram considerados a aplicação de carga até o valor de 31,35 kN/m para todas as vigas. As Figuras 7 e 8 apresentam as curvas Carga *versus* Tensão para as vigas com abertura de forma circular e retangular, respectivamente.

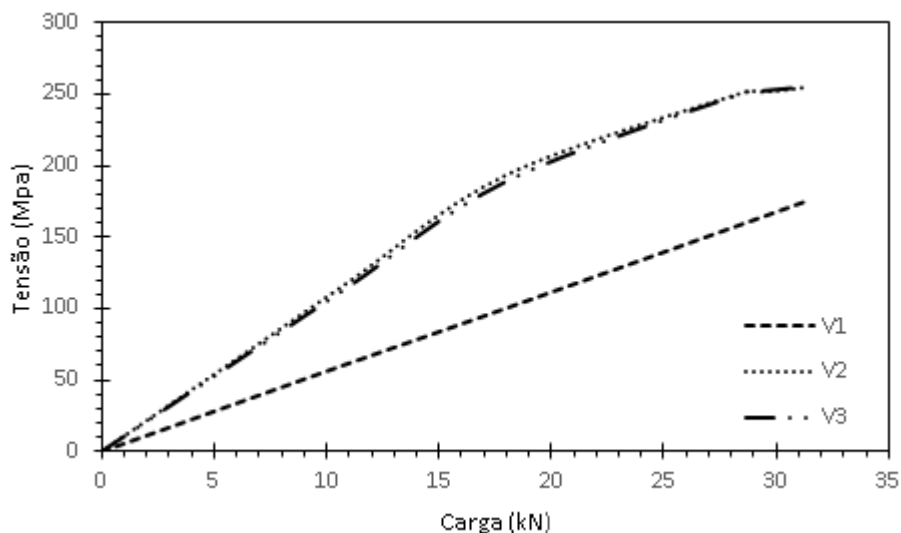


Figura 7. Relação carga-tensão na borda de abertura circular

Observa-se que a viga V1, com a presença da abertura na posição centralizada, apresenta o nível de Tensão Máxima de 174 MPa. Com a variação da posição da abertura em relação à altura do perfil percebe-se uma significativa alteração no nível das tensões, atingindo um valor de 256 MPa para a viga que possui o menor Tê superior (V3). Para o caso em análise, observa-se que a variação da altura do Tê superior de 0,3d para 0,10d provoca um acréscimo de tensões de 47 %.

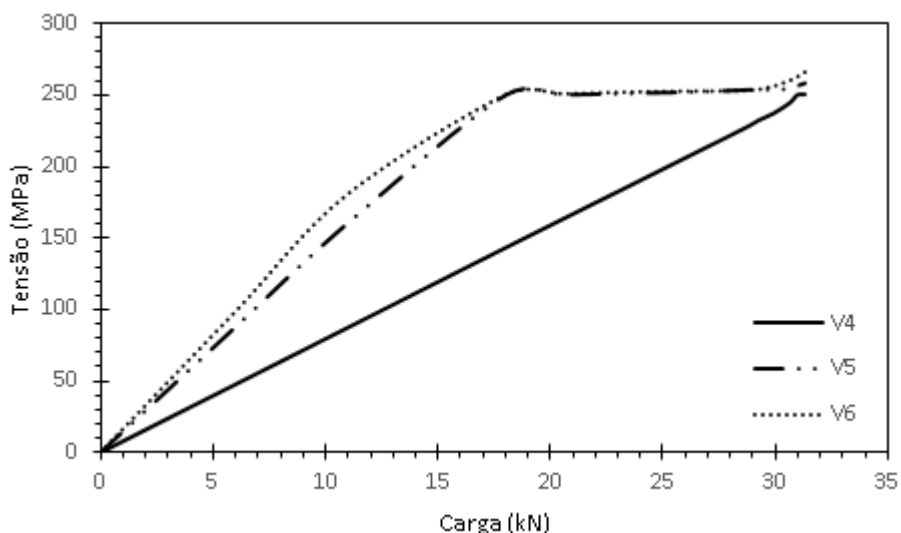


Figura 8. Relação carga-tensão na borda de abertura quadrada

Para os resultados obtidos dos modelos com aberturas retangulares, apresentados na Fig. 8, verifica-se que a viga V4 (com abertura centralizada) apresenta escoamento, contudo na presença da carga máxima. Comparando esse modelo com a viga V1 observa-se que a mudança no formato da abertura altera a distribuição de tensões para o mesmo nível de carregamento.

Para as aberturas retangulares verifica-se que a variação da altura acarreta numa perda de resistência estrutural, visto que os modelos V5 e V6 apresentam escoamento numa faixa de

carregamento menor, 18 kN/m. Comparando com os outros modelos que atingem esse nível de tensões com uma carga de 30 kN/m, verifica-se que essa redução é da ordem de 40 %.

A Tabela 2 apresenta uma relação de tensões para os modelos com uma carga de 15 kN para fins de comparação. Percebe-se que existe uma diferença significativa de tensões entre os modelos de abertura circular e retangular. Em média as tensões obtidas na borda das aberturas retangulares são aproximadamente 30 % maiores do que nas circulares. Quando avaliadas a influência da posição da abertura em relação à altura da viga, obteve-se uma diferença de 88,55 % comparando as tensões entre V1 e V3. Resultados semelhantes foram obtidos com relação as vigas com aberturas retangulares, uma diferença de 85,27 % entre as vigas V4 e V6. Na Figura 9 é apresentada a configuração da distribuição de tensões no contorno da abertura

Tabela 2 – Relação de tensões para carga de 15 kN.

Abertura Circular		Abertura Retangular		Comparação
Vigas	$\sigma(1)$	Vigas	$\sigma(2)$	(1)/(2)
V1	83,40	V4	118,97	70,10%
V2	160,82	V5	211,39	76,08%
V3	157,46	V6	220,41	71,44%

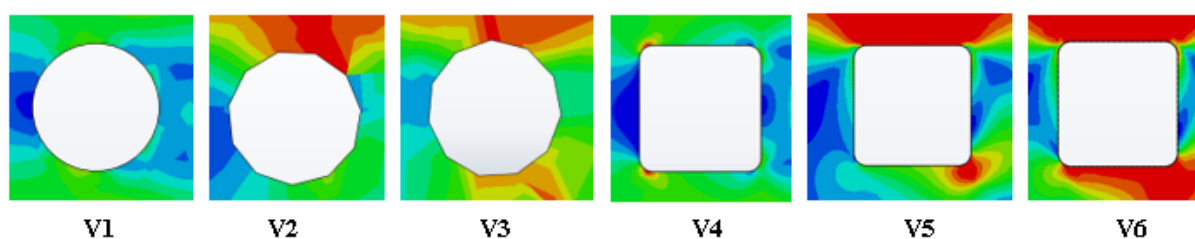


Figura 9. Distribuição de tensões na região da abertura para os 6 casos analisados.

Foi analisada a relação carga-deslocamento no centro do vão e o comportamento dos modelos foram muito semelhantes em todos os casos, sendo os resultados apresentados na Fig. 10. Destaca-se com isso que há uma influência na distribuição de tensões, mas não foi observado uma alteração significativa na rigidez do elemento.

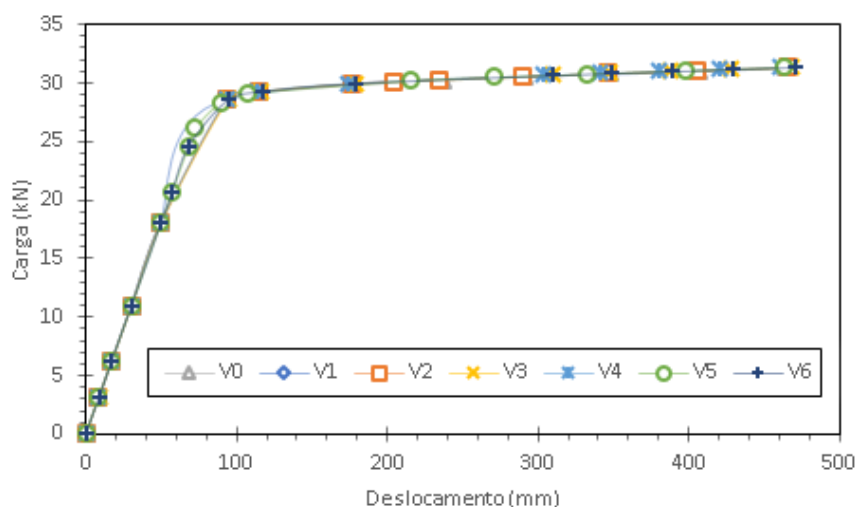


Figura 10. Relação carga-deslocamento para a parte tracionada da viga a meio vão

5 CONCLUSÃO

É constatada a influência do efeito concentrador de tensão nas aberturas. Este efeito é mais proeminente nas aberturas quadradas, onde deve-se adotar raios de concordância maiores que a recomendação da literatura (anexo S da ABNT NBR 8800:2008) para evitar plastificação nas regiões adjacentes à abertura.

Para aberturas com dimensões restritas ao limite de 1/3 da altura do perfil, não foi constatada a influência do efeito da perda de inércia devido à abertura para a deflexão da estrutura. Para aberturas maiores que 1/3 da altura do perfil, a influência da perda de inércia pode ser significativa para efeitos de deslocamentos. Esses resultados não são totalmente conclusivos indicando a necessidade de mais pesquisas sobre o assunto.

6 PERMISSÃO

É permitida a publicação de todo conteúdo intelectual produzido neste artigo com a correta citação das devidas fontes.

REFERÊNCIAS

American Institute of Steel Construction: *Steel and Composite Beams with Web Openings*. Steel Design Guide of Series 2. Chicago, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 8800: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

Bellei, I. H.; Pinho, F. O.; Pinho, M. O., 2008. *Edifícios de Múltiplos Andares em Aço*. 2ed. São Paulo, PINI.

Craig JR., R. R., 2001. *Mechanics of Materials*. John Wiley & Sons, Ltd. 3ed. Jefferson City.

Ediliziainrete. *Arcelor Celular Beams: Travi alveolar in acciaio per coperture o solai*. Disponível em: <<http://ediliziainrete.it/prodotti/arcelor-cellular-beams>> Acesso em 09 nov 2016.

Hibbitt, Karlsson & Sorensen. INC., 2000. *ABAQUS/CAE User's Manual*. Michigan.

Lawson, R. M.; Hicks, S. J., 2011. *Design of Composite Beams with Large Web Openings*. Steel Construction Institute. Ascot.

Pacheco, A. S., 2013. *Avaliação do Fator de Concentração de Tensão Presente em um Reparo de Tubulação DE Aço AISI 316L*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes.

Reddy, J. N., 2004. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. New York. Oxford University Press Inc.

Veríssimo, G. S., 1996. *Análise e Comportamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas com Aberturas na Alma*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Veríssimo, G. S.; Ribeiro, J. C. L.; Fakury, R. H.; Paes, J. L. R., 2012. *Projeto de Aberturas em Almas de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto*. Instituto Aço Brasil - Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro.