



ESTUDO DA ESTABILIDADE DE VIGAS DE AÇO COM FUROS

João Braga

Elisa Sotelino

joaovenel@gmail.com

sotelino@puc-rio.br

Departamento de Engenharia Civil (Estruturas). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rua Marques de São Vicente, 225, Gávea, 22451-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo: Estruturas cada vez mais esbeltas têm sido usadas para otimizar edifícios de grande porte e reduzir custos, inclui-se nisto, o pé-direito das edificações e consequentemente a altura das vigas. Grandes vãos são cada vez mais comuns, principalmente quando se utiliza aço em edificações, gerando então amplos espaços de serviço em uma direção, mas obstáculos na outra pela continuidade das vigas. A utilização de aberturas na alma das vigas para passagem de tubulações de ar-condicionado, incêndio, etc., evita um acréscimo na altura. Em consequência da utilização de furos em vigas há uma diminuição na capacidade resistente e no momento crítico desses elementos estruturais. O presente trabalho investiga a perda de estabilidade de vigas devido à presença de furos. Estudos numéricos com aplicação do método dos elementos finitos utilizando um modelo elástico foram realizados investigando três tipos de furos: circulares, retangulares e hexagonais presentes no meio do comprimento da viga. Além disso, também foi estudado o efeito de mais de um furo em vigas, sendo estes contidos no terço médio da mesma. Para tal, utilizou-se de oito perfis I de uso prático. A comparação entre essas alternativas descritas destacou-se a superioridade dos furos circulares e hexagonais. Para estes elementos com mais de um furo observou-se que o momento crítico foi superior aos dos elementos com furos retangulares.

Palavras Chaves: Furos em Vigas de aço, Abertura em Almas, Estabilidade de Vigas, Elementos Finitos e Análise Paramétrica

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas de aço tem crescido muito nos últimos anos devido ao desenvolvimento de novas técnicas construtivas e as ferramentas computacionais sofisticadas (maior capacidade de processamento e armazenamento de dados) capazes de reproduzir com maior precisão o comportamento das estruturas.

Associado a este crescimento, estruturas cada vez mais esbeltas têm sido usadas para reduzir custos e otimizar espaços úteis em edifícios de grande porte. Seguindo esta tendência grandes vãos são cada vez mais comuns, gerando um amplo espaço de serviço em uma direção, mas obstáculos na outra pela continuidade das vigas de aço. Segundo Chung *et al.* (2001) e (2003) 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, Figura 1. A presença de grandes aberturas na alma das vigas de aço podem proporcionar uma severa penalidade na capacidade de carga e nos momentos críticos das vigas, dependendo da forma, do tamanho e da localização dos furos.

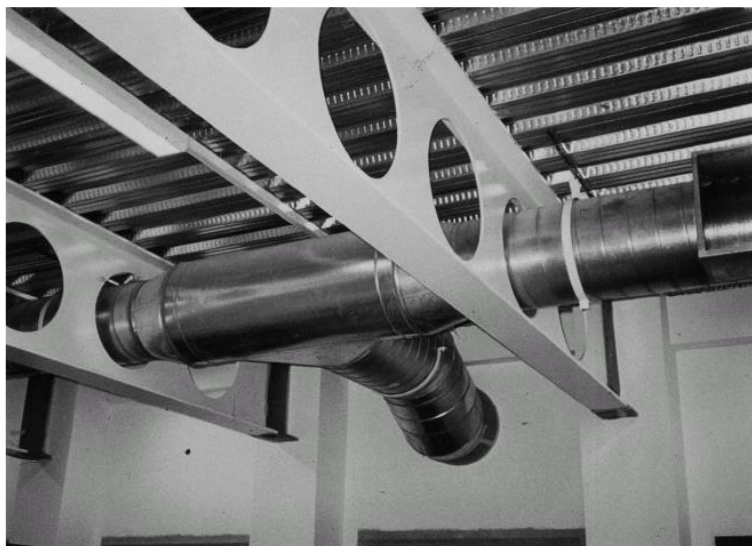


Figura 1. Viga com uma série de aberturas circulares

Shanmugam et al. (2002) estudaram um modelo em elementos finitos para a previsão do comportamento e da carga última de vigas soldadas (*plategirdes*) com aberturas circulares e retangulares de diversos tamanhos na alma. A Figura 2 mostra que a carga de ruína decresce continuamente com o aumento da abertura na alma e que o decréscimo da capacidade de carga é aproximadamente linear.

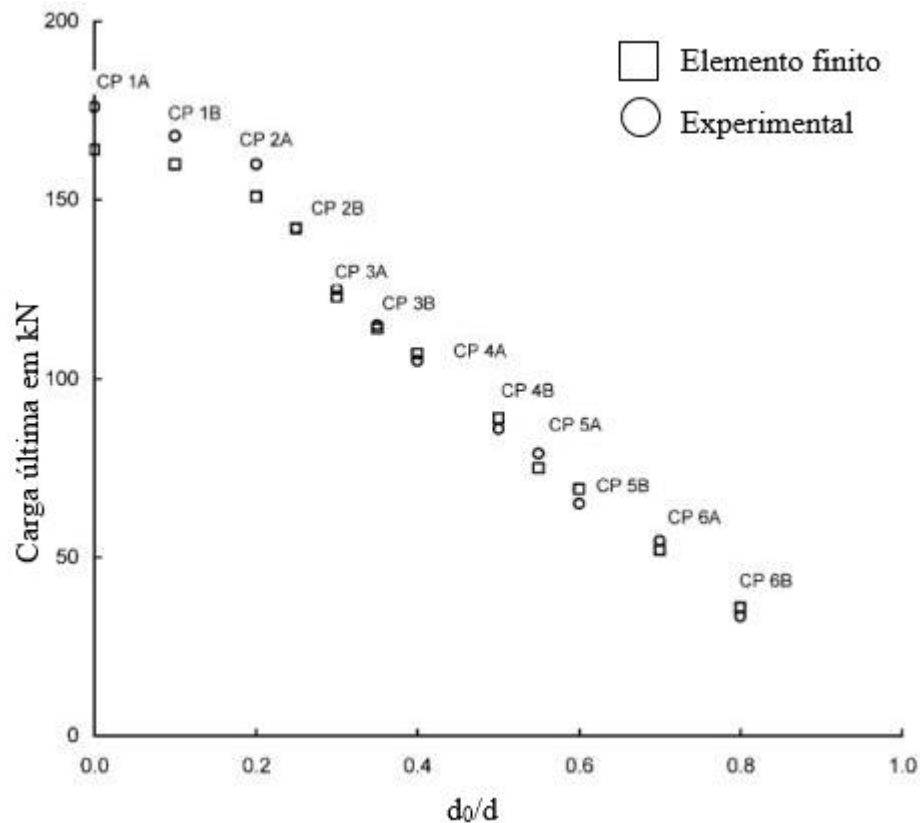


Figura 2. Carga última versus tamanho da abertura (furo circular)

Moen & Schafer (2009) estudaram a flambagem elástica de colunas e vigas de aço formados a frio com a presença de furos. Os autores realizaram estudos com colunas e vigas (modelo 3D), porém eles também realizaram estudos prévios onde foi modelada somente a alma desses elementos estruturais. Esse modelo 2D foi considerado satisfatório visto que a alma da coluna ou da viga é a região mais suscetível a instabilidade devido a presença do furo. Para realizar esse estudo de flambagem elástica os autores realizaram uma análise de autovalores e autovetores. Nesse estudo foram variadas a largura, h , e comprimento, L , da placa, sendo essas dimensões indicadas na Figura 3. A altura do furo, (h_{hole}), e a largura do furo, (L_{hole}), foram mantidas constantes a fim de se analisar a influência da relação altura do furo sobre a altura da placa (h_{hole}/h) na tensão crítica da placa com furo. As condições de contorno utilizadas para modelar a alma da coluna foram simplesmente apoiada em seus quatro bordos e submetida a uma pressão uniforme de compressão, Figura 3. O resultado de seu estudo é mostrado na Figura 4. Observa-se que para um furo grande em relação a largura da placa ($h_{hole}/h=0,66$) e, para L/L_{hole} pequeno a tensão crítica de uma placa com furo é 7 % mais alta do que de uma placa sem furo, Figura 4. Este aumento na tensão crítica é explicado pela configuração deformada, Figura 5. Moen (2009) observou que a presença do furo grande causou um enrijecimento da placa na posição do furo fazendo com que a flambagem ocorresse longe do furo, Figura 5.(a), para um comprimento de meia onda menor do que a placa sem furo. Em relação a placa sem furo, observou-se que sua flambagem se desenvolveu globalmente em todo o seu comprimento, Figura 5.(b). Ademais, também observou-se que a medida que o comprimento da placa aumentou, além de $L/L_{hole} = 5$, a tensão crítica convergiu para a de uma placa sem furo, Figura 4.

Para placas com furo menor, ou seja, h_{hole}/h menor que 0,66, o furo oblongo causa uma diminuição na tensão crítica que converge para uma grandeza constante para valores de $L/L_{\text{hole}} \geq 5$, Figura 4. Esse comportamento também pode ser explicado pelo modo de flambagem da placa, onde observou-se que a flambagem ocorre na posição do furo devido a perda de rigidez transversal a flexão da placa devido a presença do furo, Figura 6.

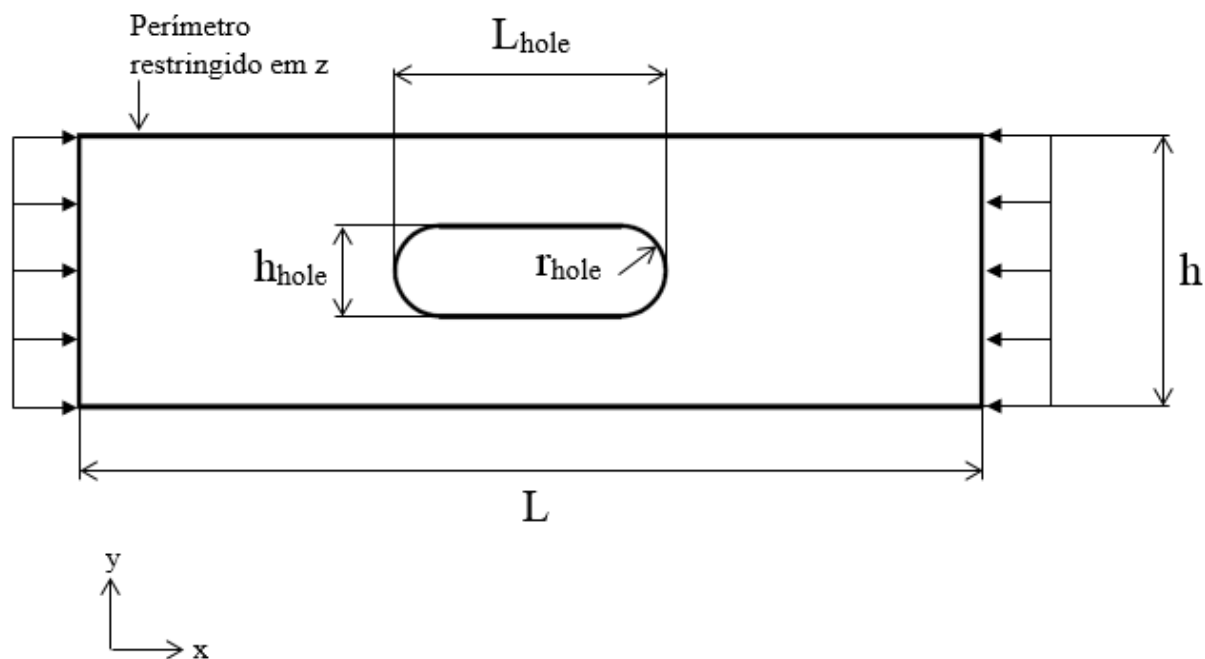


Figura 3. Definição das dimensões da placa e condições de contorno

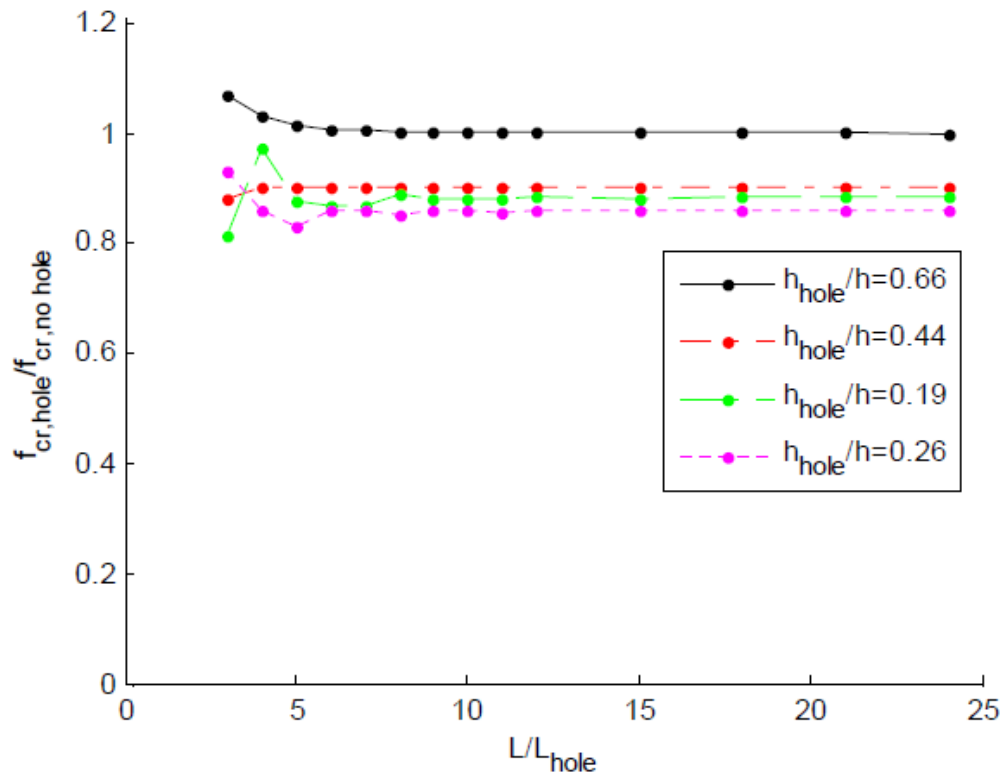


Figura 4. Influência de um furo oblongo na flambagem elástica de uma placa retangular para diferentes comprimentos de placas

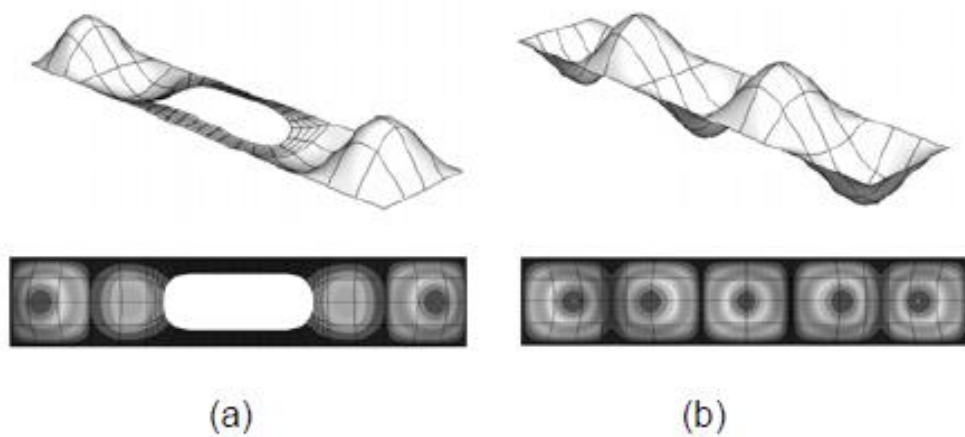


Figura 5. Comparação da deformada e curvas de deslocamento para uma placa retangular com $h_{hole}/h=0,66$ e $L/L_{hole}=3$, com furo oblongo e sem furo

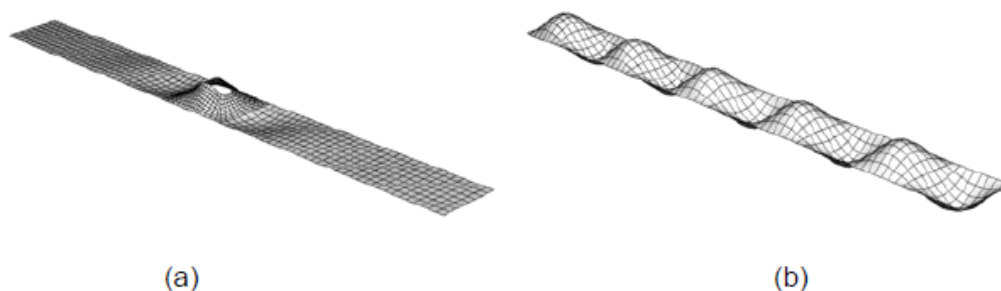


Figura 6. Comparação da deformada dos modos de flambagem de uma placa com $h_{hole}/h=0,26$ e $L/L_{hole}<5$ com furo oblongo e uma placa sem furo

2 ESTABILIDADE DE VIGAS COM FUROS

Nesta sessão foram feitas análises elásticas lineares através do método dos elementos finitos onde foram obtidos os autovalores e autovetores. Os autovalores representam o momento crítico e os autovetores os modos de flambagem da viga. Esses resultados foram comparados entre si e analisados no decorrer do presente trabalho. Essa metodologia é estabelecida a partir dos resultados de diversos modelos simulados através do programa computacional Abaqus (2010).

2.1 Carregamento e condições de contorno

Para o estudo foi escolhida uma viga biapoiada carregada por duas forças concentradas, sendo o primeiro carregamento a um terço do vão e o segundo carregamento a dois terços do vão, Figura 7. Essa configuração de carregamento foi escolhida porque é a mais comum de ocorrer em estruturas metálicas, proporcionando uma região sujeita à flexão pura entre os pontos de aplicação dos carregamentos.

As condições de contorno idealizadas a fim de representar essa viga biapoiada são também mostradas na Figura 7. Para tanto, foi simulado um apoio de primeiro gênero restringindo-se em x e y o nó localizado na metade da altura da alma. O apoio de segundo gênero foi modelado no outro apoio da viga, restringindo em x, y e z o nó localizado na metade da altura da alma. Buscou-se simular a situação real onde a laje evita que ocorra a flambagem lateral, portanto foram restringidos em x os nós da metade da largura da mesa superior em todo o seu comprimento. Em todos os modelos foram utilizados as seguintes propriedades dos materiais; módulo de elasticidade $E = 200\text{GPa}$, tensão de escoamento $f_y = 345\text{MPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$.

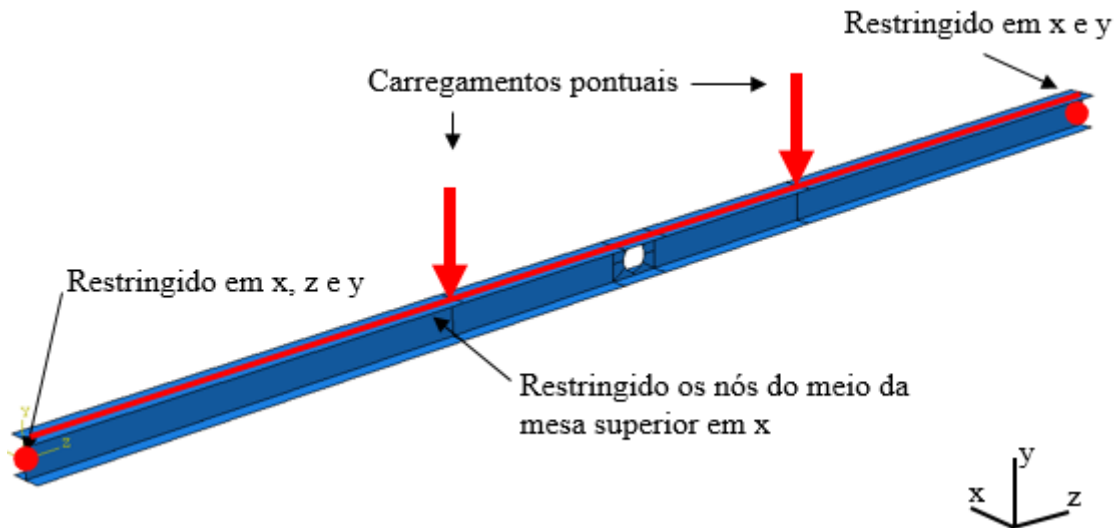


Figura 7. Carregamentos e condições de contorno de uma viga biapoada com furo hexagonal

As análises de todos os modelos foram feitas utilizando o software Abaqus. Em todos os modelos foram utilizados os elementos S8R5. A saber, o “5” em S8R5 denota que cada nó do elemento tem 5 graus de liberdade (três translacionais e dois rotacionais) ao invés de 6 (três translacionais e três rotacionais). A rotação do nó sobre o eixo normal a superfície média é removida da formulação do elemento melhorando sua eficiência computacional. O “R” em S8R5 denota que o cálculo da rigidez do elemento não é exata; o número de pontos de integração de Gauss é reduzido para melhorar a eficiência computacional e também para evitar o travamento da malha (*shear locking*). Esta “integração reduzida” algumas vezes resulta em modos espúrios, sem deformação da seção transversal do elemento, Cook (1989).

O estudo da convergência das malhas e as recomendações propostas por Moen (2009) estão resumidas abaixo:

- A razão de aspecto dos elementos distorcidos presentes na malha próxima ao furo deve apresentar razão a/b entre 0,5 e 2,0. Sendo “a” e “b” mostrados na Figura 8.(e).
- A razão de aspecto para os elementos longe do furo devem ser de no máximo 8:1, Figura 8.(a).

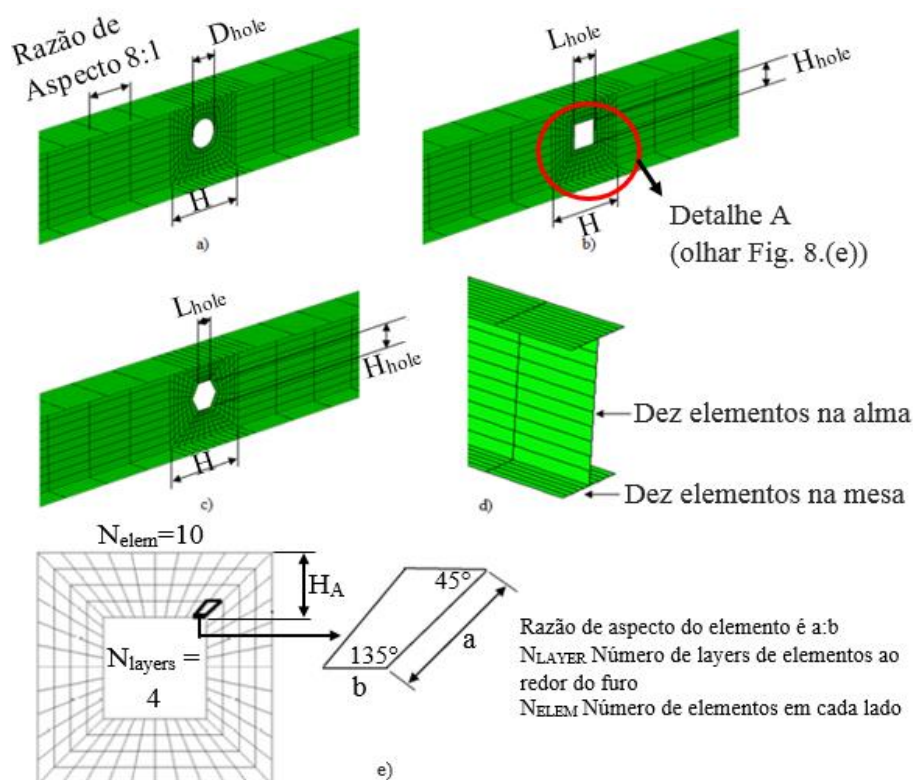


Figura 8. (a) Malha de elementos finitos da viga com furo circular (com a razão de aspecto igual a 8:1 para elementos longe do furo), (b) retangular e (c) hexagonal. Além disso, também é possível visualizar os (d) detalhes das malhas na alma e na mesa e também a (e) discretização do furo usando elemento S8R5

2.2 Estudo computacional do comportamento de vigas com furos

A estudo é realizado utilizando-se parâmetros para o dimensionamento, isto é, as dimensões ficam atreladas a parâmetros predefinidos. Assim, quando há uma mudança nesses parâmetros todas as dimensões atreladas a eles também mudam. Esse recurso é uma das vantagens proporcionadas pelo Abaqus Scripting Interface (2012). O Abaqus Scripting Interface é uma extensão da linguagem orientada a objetos popularmente chamada Python.

No trabalho foram parametrizadas as dimensões da viga; altura, h , largura do flange, b_f , espessura da alma, t_w , espessura do flange, t_f , a fim de reproduzir oito tipos de perfis diferentes. Foram escolhidos os perfis dentre os perfis da série I produzidos pela Gerdau, com altura variando de 200mm a 610mm. Os perfis escolhidos bem como suas dimensões são mostrados na Tabela 1. Esses perfis foram escolhidos pois são os mais empregados na prática da Engenharia, abrangendo toda a gama de altura atualmente comercializada.

Tabela 1. Perfis utilizados no trabalho e suas dimensões

Bitola	d (mm)	b _f (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	h (mm)
W200x35,9	201	165	6,2	10,2	181
W250x38,5	262	147	6,6	11,2	240
W310x38,7	310	165	5,8	9,7	291
W360x44,0	352	171	6,9	9,8	332
W410x46,1	403	140	7	11,2	381
W460x52,0	450	152	7,6	10,8	428
W530x72,0	525	165	8,9	11,4	502
W610x101,0	603	228	10,5	14,9	573

Tabela 2. Esbeltez da mesa e da alma e classificação da seção

Bitola	λ Alma (h/t _w)	λ Mesa (b _f /2t _f)	Classificação
W 200x35,9	29,13	8,09	Compacta
W 250x38,5	36,3	6,56	Compacta
W 310x38,7	50,1	8,51	Compacta
W 360x44,0	48,17	8,72	Compacta
W 410x46,1	54,37	6,25	Compacta
W 460x52,0	56,37	7,04	Compacta
W 530x72,0	55,8	9,5	Compacta
W 610x101,0	54,59	7,65	Compacta

2.3 Estudo de Viga sem Furo

Cada perfil foi modelado inicialmente em sua forma original, sem furos, para servir de padrão comparativo, usando o software Abaqus. A Figura 9, mostra os momentos críticos obtidos para cada perfil.

Observou-se que para os perfis menores, W200 a W360, a instabilidade se reflete preferencialmente na flambagem local de mesa (LF, sendo “L” referente a flambagem local e “F” referente a flambagem da mesa, sendo as legendas indicadas em inglês), Figura 10.(a). A saber, isso acontece porque embora a seção desses perfis tenha sido classificada como compacta, Tabela 2, a alma para os perfis baixos e proporcionalmente mais compacta que as mesas fazendo com que a flambagem ocorra preferencialmente na mesa. Para os perfis medianos, W410 e W460, a flambagem ocorre preferencialmente na alma (LW, sendo “L” referente a flambagem local e “W” referente a flambagem da alma, sendo as legendas

indicadas em inglês), Figura 10.(b), pois neste caso a mesa é proporcionalmente mais compacta que a alma, Tabela 2, visto que o grupo das vigas medianas é mais altos que o grupo das vigas baixas, consequentemente isto favorece a flambagem da alma.

Para os perfis mais altos, observou-se que o W530 flambou preferencialmente na mesa (LF), Figura 11.(a) e o perfil W610 flambou ao mesmo tempo na mesa e na alma (LF + LW), Figura 11.(b). Constatou-se que esses dois perfis apresentam alma mais compacta que o grupo dos perfis medianos, Tabela 2, favorecendo com que as vigas flambassem para momentos críticos maiores.

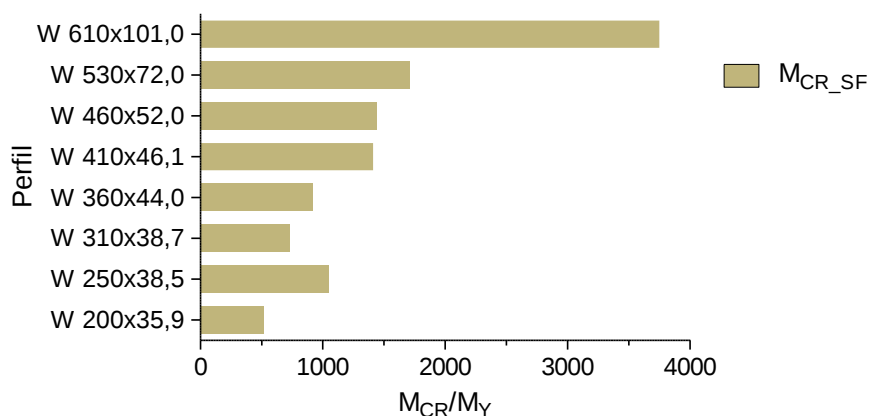


Figura 9. Momento crítico viga sem furo (M_{CR_SF})

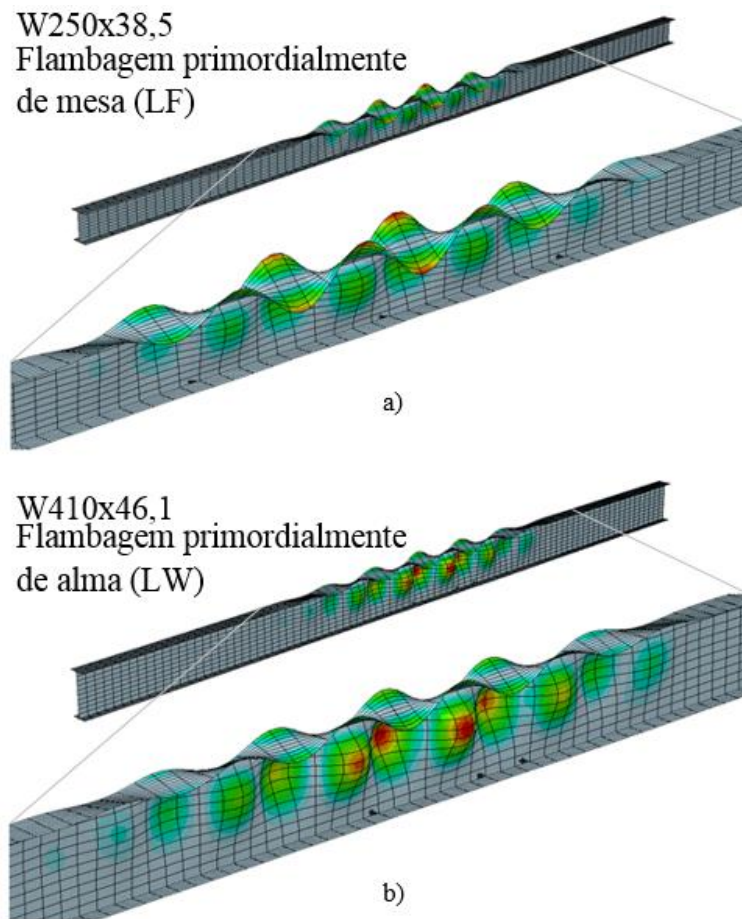


Figura 10. Modos de flambagem das vigas sem furo dos perfis (a)W250 e (b) W410

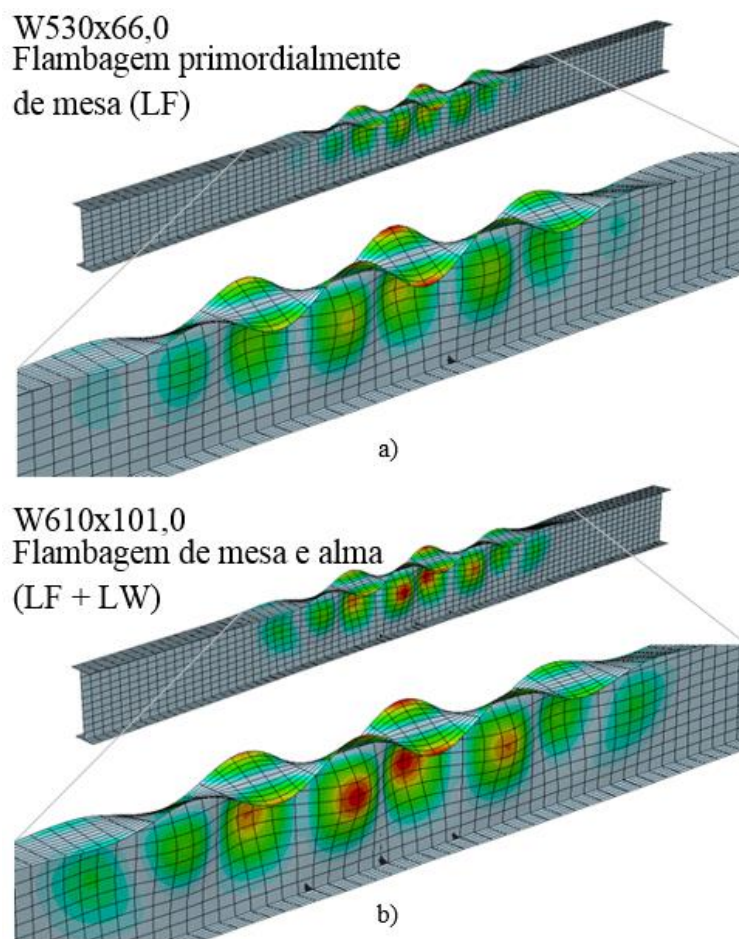


Figura 11. Modos de flambagem das vigas sem furo dos perfis (a) W530 e (b) W610

2.4 Vigas com Um Único Furo Circular

Foram modeladas oito vigas com um furo circular na metade do comprimento, fabricadas através do recorte da alma por plasma, Figura 15.(a). Em todos os modelos o diâmetro da abertura circular foi considerado igual a 1/3 da altura da viga, conforme recomendado pela NBR-8800 (2008)

Os gráficos dos momentos críticos (M_{CR}) foram normalizados com o momento de escoamento (M_Y) para facilitar a análise dos dados e também para trabalhar com valores adimensionais. Por exemplo, o momento crítico (M_{CR}) para os perfis maiores alcançou valores de até 3600kNm enquanto a razão M_{CR}/M_Y teve uma máxima variação de 7 unidades.

Pode se classificar o comportamento das vigas com um furo circular do ponto de vista do momento crítico (M_{CR}) em três grupos:

- As vigas baixas (W200, W250, W310 e W360), que possuem as almas mais compactas, e, portanto, tendem a flambar na mesa.

- As vigas medianas (W410 e W460), que possuem alma menos compacta que os perfis com pouca altura, e, portanto, tendem a flambar na alma.
- As vigas altas (W530 e W610), estão no limite entre a flambagem da alma (LW) ou da mesa (LF) e, portanto, a presença do furo na alma pode ocasionar uma mudança de modo de flambagem.

Para as vigas baixas, observou-se que apesar da presença do furo as vigas continuam a flambar primordialmente na mesa, porém observa-se que a flambagem ocorre em uma região mais restrita, na proximidade de onde o furo está localizado (LFH, sendo “L” referente a flambagem local, “F” referente a flambagem da mesa e “H” referente a flambagem na posição do furo, sendo as legendas indicadas em inglês), Figura 13.(a), (b). Isso ocorre porque o furo diminui a rigidez transversal a flexão da alma, favorecendo a flambagem local nessa região. Para as vigas formadas pelos perfis W250, W310 e W360 observou-se que o modo LFH ocasionou uma ligeira redução no momento crítico, que foi de 0,7%, 1,5% e 2,3%, respectivamente, Figura 12.

Especificamente para a viga W200, observou-se um aumento no momento crítico de aproximadamente 8,5%, Figura 13.(a). Esse aumento acontece porque o furo na alma para vigas com altura de alma pequena induzem ao aumento da rigidez da mesma, isto está de acordo com o que foi relatado no trabalho de Moen (2009). Para os demais perfis classificados como de baixa altura (W250, W310 e W360), o aumento de rigidez da alma é anulado pela flambagem local, provocada pelo furo, já que o tamanho do furo aumenta proporcionalmente com a altura do perfil ($\phi = 1/3h$), o tornando mais suscetível à flambagem local.

Observou-se que para vigas com perfis medianos (W410 e W460), as vigas com furo circular flambaram na alma (LWH, sendo “L” referente a flambagem local, “W” referente a flambagem da alma e “H” referente a flambagem na posição do furo, sendo a legenda indicada em inglês). Esse modo é semelhante ao das vigas sem furo que flambaram na alma (LW). Contudo, na viga com furo a flambagem na alma se restringiu na posição onde o furo está localizado, Figura 14.(a). Observou-se que o modo LWH ocasiona uma diminuição no momento crítico de aproximadamente 9,5% e 7,6%, para os perfis W410 e W460, respectivamente, Figura 12. Essa maior redução está relacionada ao fato do perfil de alma cheia inicialmente flambar na alma (LW). Levando em consideração essa mesma viga, porém com furo, observa-se que novamente o furo proporciona uma diminuição da rigidez transversal a flexão da alma, provocando a instabilidade na posição do furo (LWH).

Para os perfis altos (W530 e W610), observou-se mudanças nos modos de flambagem em relação às mesmas vigas de alma cheia. Para W530 a viga sem furo que inicialmente flambava na mesa (LF) passou a flambar na alma devido a presença do furo (LWH + LFH, sendo que o modo de flambagem que aparece primeiro “LWH” é o predominante), Figura 14.(b). Para o perfil W610 de alma cheia que flambava na mesa e na alma (LF + LW), depois da inclusão do furo circular passou a flambar somente na alma (LWH, Figura 14.(b)). Essas mudanças ocorrem porque esses perfis estavam no limite entre a flambagem da alma e da mesa e quando o furo foi incluído na alma provocou uma diminuição na rigidez transversal da alma propiciou essa mudança. Para os perfis W530 e W610, observou-se uma redução no momento crítico de 4,2% e 5,6%, respectivamente, Figura 12, que está relacionada a flambagem local no furo.

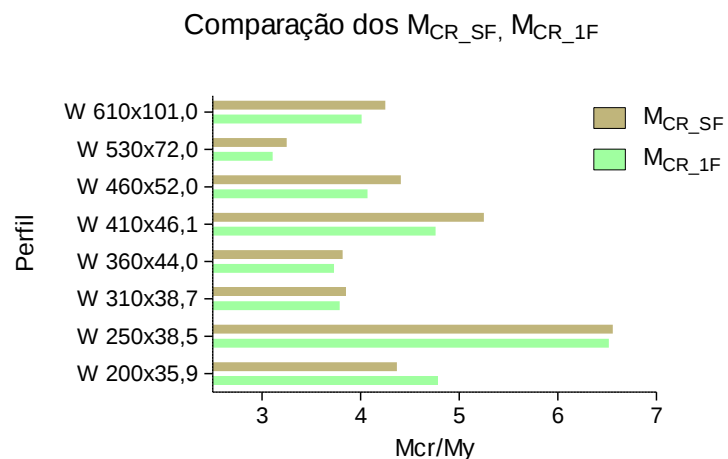


Figura 12. Gráfico comparativo do momento crítico da viga sem furo (M_{CR_SF}) e momento crítico da viga com um furo pequeno ($M_{CR_1F_CONF.1}$) e grande ($M_{CR_1F_CONF.2}$)

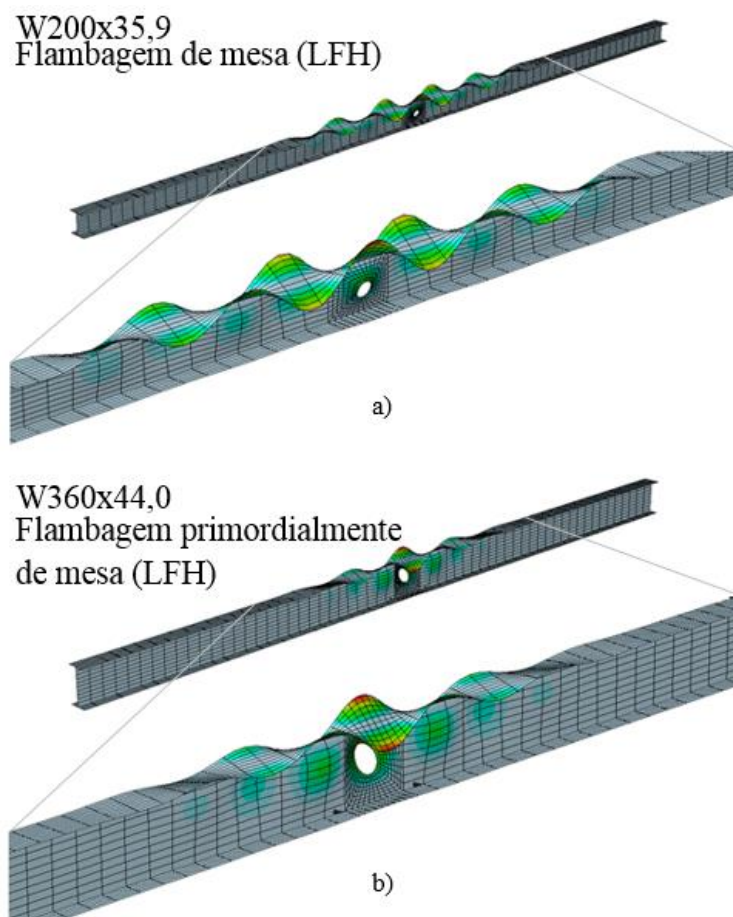


Figura 13. Modos de flambagem das vigas com um furo formadas pelos perfis (a) W200 e (b) W360

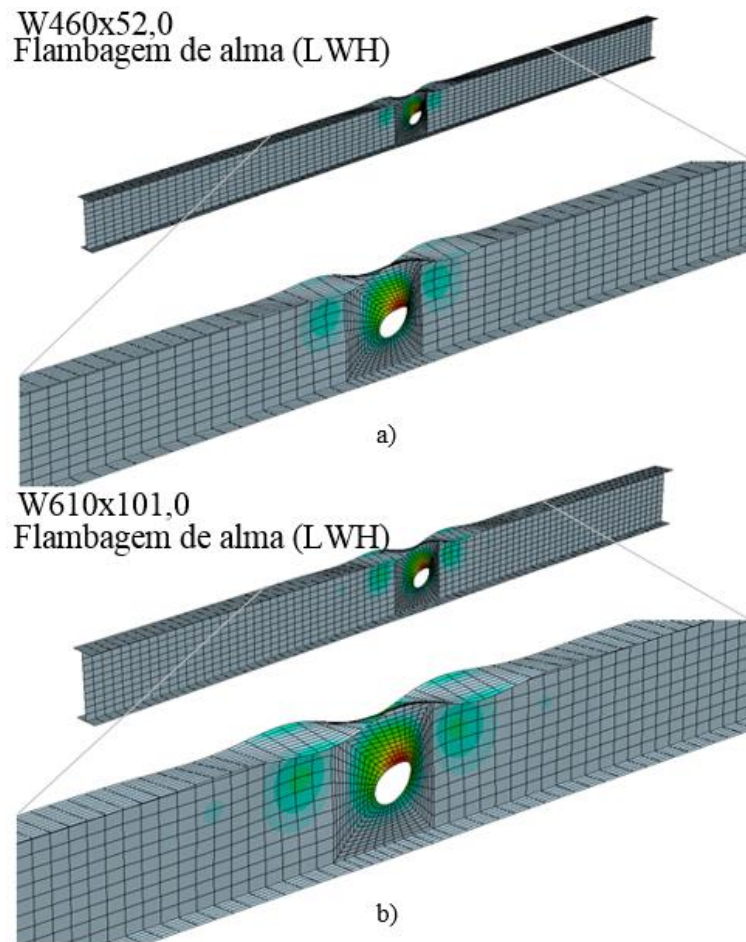


Figura 14. Modos de flambagem das vigas com um furo formadas pelos perfis (a) W460 e (b) W610

3 ESTUDO COMPARATIVO DE VÁRIOS TIPOS DE FUROS EM VIGAS COM UM FURO

Foram analisados os três tipos de furos mais frequentemente encontrados na prática da engenharia, isto é, circulares, retangulares e hexagonais, Figura 15. Para cada um desses furos foram estudadas duas configurações diferentes de tamanhos de furos, furos pequenos e furos grandes. Sendo que para as vigas com furos pequenos a altura dos furos foi modelada de modo que correspondesse a 1/3 da altura total da viga, Tabela 3. Já para as vigas com furos grandes a altura dos furos foi de 2/3 da altura total da viga, Tabela 4.

Para possibilitar a análise do tipo de furo os três furos foram modelados com a mesma área. Isto é, todos os três tipos de furos pequenos possuem a mesma área e os três tipos de furos grandes também possuem a mesma área.

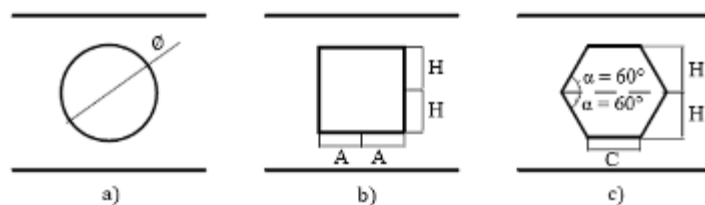


Figura 15. Três tipos de furos estudados no trabalho (a) circular, (b) retangular e (c) hexagonal.
Sendo as dimensões dos parâmetros indicados na Tabela 3 e Tabela 4

Tabela 3. Dimensões dos furos configuração 1 (furos pequenos)

	Circular (mm)	Retangular (mm)		Hexagonal (mm)	
Perfil	$\varnothing$	A	H	C	H
W 200x35.9	65	28.8	28.8	35.7	31.0
W 250x38.5	80	35.4	35.4	44.0	38.1
W 310x38.7	100	44.3	44.3	55.0	47.6
W 360x44.0	120	53.2	53.2	66.0	57.1
W 410x46.1	134	59.4	59.4	73.7	63.8
W 460x52.0	150	66.5	66.5	82.5	71.4
W 530x72.0	175	77.5	77.5	96.2	83.3
W 610x101.0	203	90.0	90.0	111.6	96.7

Tabela 4. Dimensões dos furos configuração 2 (furos grandes)

	Circular (mm)	Retangular (mm)		Hexagonal (mm)	
Perfil	$\varnothing$	A	H	C	H
W 200x35.9	125	55.4	55.4	68.7	59.5
W 250x38.5	165	73.1	73.1	90.7	78.6
W 310x38.7	200	88.6	88.6	110.0	95.2
W 360x44.0	225	99.7	99.7	123.7	107.1
W 410x46.1	260	115.2	115.2	143.0	123.8
W 460x52.0	290	128.5	128.5	159.4	138.1
W 530x72.0	340	150.7	150.7	186.9	161.9
W 610x101.0	390	172.8	172.8	214.4	185.7

Foram observados dois fatos importantes na análise dos tipos de furos. Primeiro, constatou-se que o momento crítico das vigas com furo circular e hexagonal foram muito semelhantes, e, segundo, observou-se que as vigas com furo circular e retangular apresentaram a maior diferença nos momentos críticos.

O momento crítico não variou muito para diferentes tipos de furos. Para vigas com um furo a diferença máxima foi de 0,94% (para W410) e 4,3% (para W530) para as vigas das configurações 1 e 2, respectivamente, Figura 16 e Figura 17.

Observou-se que essa maior diferença ocorreu entre o furo circular e retangular. Sendo que a viga com furo retangular foi o que obteve o menor momento crítico para todos os modelos analisados. Em relação ao furo retangular, observou-se que a presença desse furo, causou uma maior redução na rigidez da alma. Sendo esse comportamento observado para furos pequenos e grandes. Especificamente para os furos retangulares grandes, observou-se que houve uma redução maior de até 4,3%. Já para os furos circular e hexagonal observou-se que a presença do furo causou uma perda de rigidez da alma de magnitude similar, visto que a redução no momento crítico para a viga original foi semelhante.

Observou-se também que os furos circulares e hexagonais apresentaram momentos críticos praticamente iguais para todos os tipos de furos, com diferença máxima de 0,5% e 0,9% para as seções W410 das configurações 1 e 2, respectivamente.

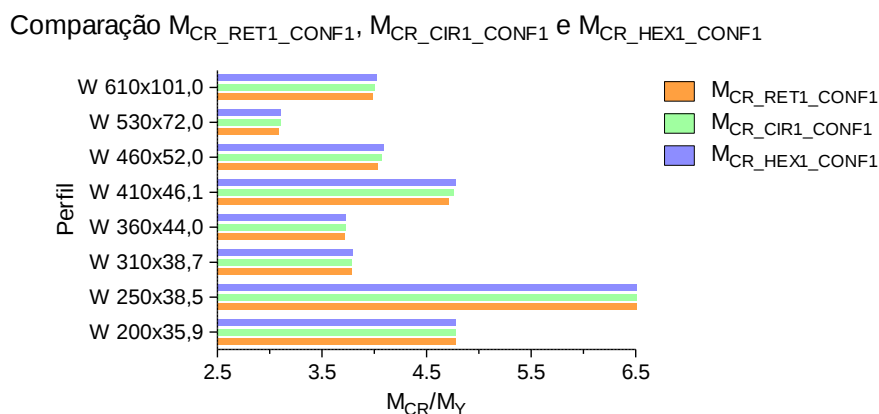


Figura 16. Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com um furo circular ($M_{CR_CIR1_CONF1}$), retangular ($M_{CR_RET1_CONF1}$) e hexagonal ($M_{CR_HEX1_CONF1}$) da configuração 1

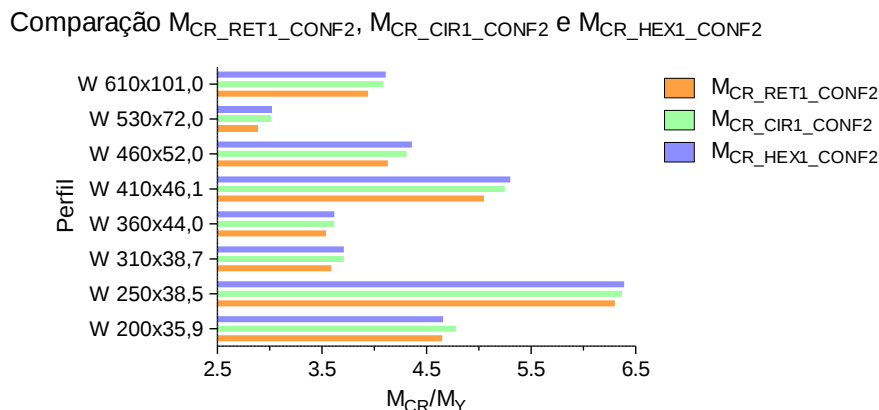


Figura 17. Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com um furo circular ($M_{CR_CIR1_CONF2}$), retangular ($M_{CR_RET1_CONF2}$) e hexagonal ($M_{CR_HEX1_CONF2}$) da configuração 2.

4 ESTUDO DE VIGAS COM MAIS DE UM FURO

Foram modeladas oito vigas com dois furos pequenos (configuração 1) e mais sete vigas com dois furos grandes (configuração 2) com espaçamento mínimo entre furos de 2,5 vezes o diâmetro do furo circular conforme prescrito na NBR-8800 (2008), para cada um dos três tipos de furo. Não foi possível modelar a viga W610 com dois furos grandes no seu terço médio do comprimento, uma vez que não seria respeitado o espaçamento mínimo recomendado pela norma. Adicionalmente, foram modeladas mais sete vigas com três furos pequenos (configuração 1) e mais três vigas com furos grandes (configuração 2), com espaçamento mínimo de 2,5 vezes o diâmetro do furo circular, para cada um dos três furos. Novamente não foi possível modelar a viga W610 com três furos pequenos e as Vigas W360, W410, W530 e W610 com três furos grandes no seu terço médio do comprimento devido ao não cumprimento do espaçamento mínimo entre furos. Todos os modelos foram feitos e analisados usando o software Abaqus.

Observa-se que o comportamento da viga com um furo, Figura 16 e Figura 17, é semelhante ao comportamento da viga com dois furos, Figura 18 e Figura 19, e três furos. Como consequência, os modos de flambagem das vigas com dois furos, Figura 20 e Figura 21, são semelhantes aos modos das vigas com apenas um furo, Figura 13 e Figura 14. Como pode-se observar na Figura 18 e Figura 19, o furo retangular apresenta os menores momentos críticos e as vigas com furo circular e hexagonal apresentam magnitude de momento crítico semelhantes.

Adicionalmente, notou-se que a inclusão de dois ou três furos no terço médio da viga praticamente não reduziu seu momento crítico em relação a viga com apenas um furo. A redução máxima foi de apenas 2,6% para o perfil W410, configuração 2. Portanto, do ponto de vista da estabilidade pode-se prever dois ou três furos no terço médio do comprimento das vigas desde que espaçados 2,5 vezes o diâmetro do furo.

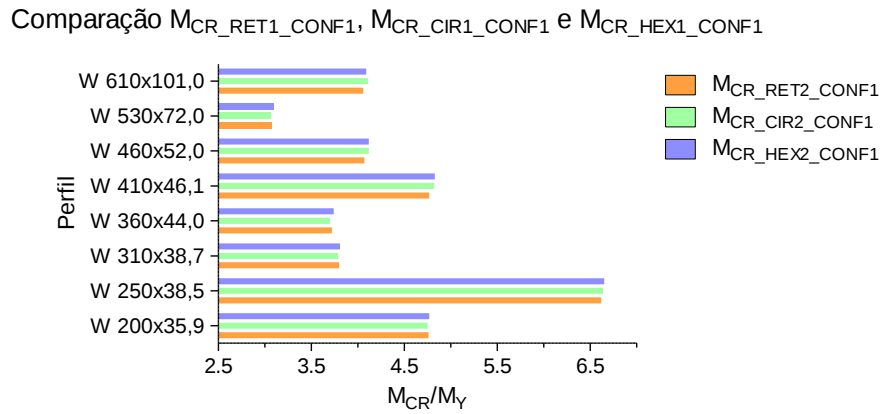


Figura 18. Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com dois furos circulares ($M_{CR_CIR2_CONF1}$), retangulares ($M_{CR_RET2_CONF1}$) e hexagonais ($M_{CR_HEX2_CONF1}$) da configuração 1

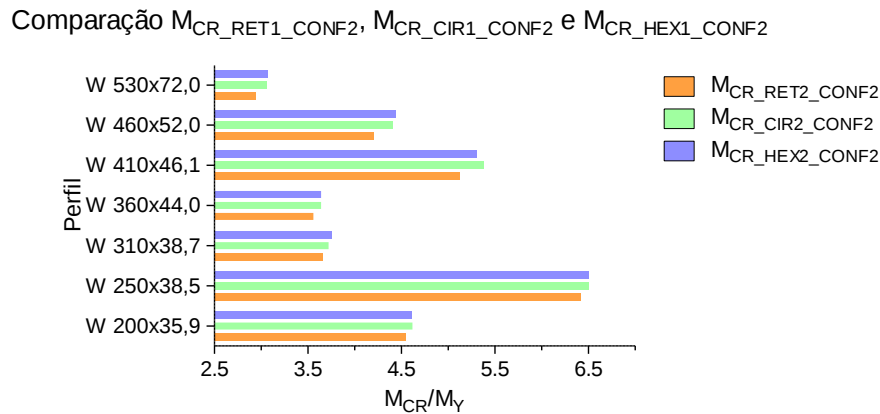


Figura 19. Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com dois furos circulares ($M_{CR_CIR2_CONF2}$), retangulares ($M_{CR_RET2_CONF2}$) e hexagonais ($M_{CR_HEX2_CONF2}$) da configuração 2

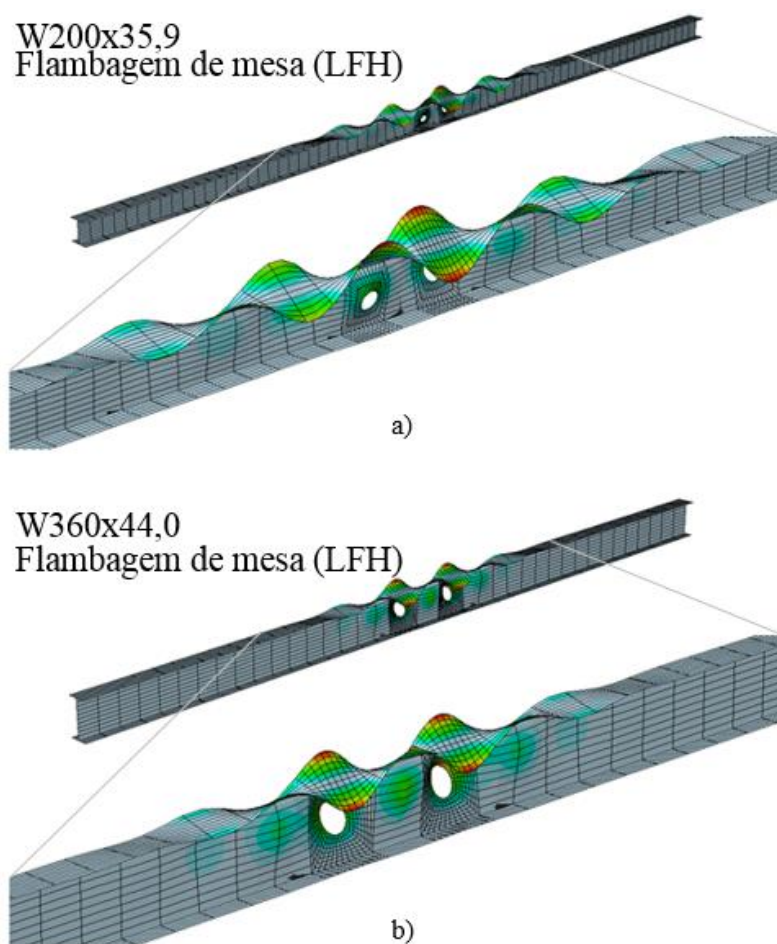


Figura 20. Modo de flambagem das vigas com dois furos circulares (configuração 1) formadas pelos perfis (a) W200 e (b) W360

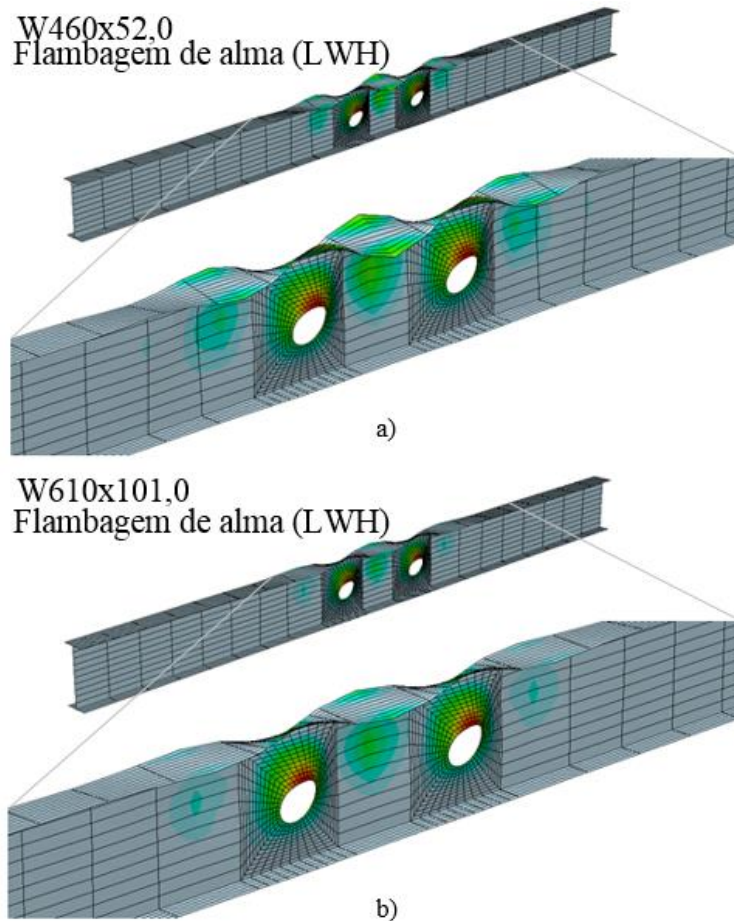


Figura 21. Modo de flambagem das vigas com dois furos circulares (configuração 1) formadas pelos perfis (a) W460 e (b) W610

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi estudar a estabilidade de vigas de aço devido a presença de furos através de um modelo elástico utilizando o método dos elementos finitos. Essa análise foi uma análise simplificada visto que as tensões obtidas nos modelos são maiores que a tensão de escoamento do aço, e, portanto, nos futuros trabalhos serão feitas análises elasto-plástica para obter resultados mais próximos da realidade. Contudo, a partir desse estudo preliminar pode-se chegar a algumas conclusões interessantes:

Para as vigas com um furo circular no meio do vão observou-se que as vigas mais altas, especialmente a viga formada pelo perfil W410, a presença de um único furo resultou em reduções no momento crítico de até 10% em relação a viga sem furo. Esse fato mostra uma considerável sensibilidade do momento crítico devido a presença de um único furo na viga.

A partir da análise da influência dos três tipos de formas de furos na alma da viga (circular, retangular e hexagonal), observou-se que o furo circular resultou nas menores

reduções no momento crítico. Do mesmo modo, as vigas com um furo hexagonal também apresentaram momentos críticos semelhantes aos das vigas com um furo circular. Contudo, as vigas com um furo retangular, apresentaram as maiores reduções no momento crítico, especialmente para as vigas com furos grandes. Portanto, o furo circular e o furo hexagonal mostraram-se as melhores opções para projetos, enquanto que o furo retangular deve ser evitado.

A partir da análise das vigas com mais de um furo, isto é, vigas com dois ou três furos no seu terço médio do vão. Observou-se que diferentemente do esperado, o momento crítico das vigas com dois e três furos praticamente não sofreu reduções em relação ao momento crítico das vigas com um furo. Conclui-se que o momento crítico não é sensível ao número de furos na zona de momento puro, desde que espaçados de 2,5 vezes a altura do furo. Essa constatação tem grande utilidade nos projetos de engenharia visto que o maior número de furos permite que um maior número de tubulações (ar-condicionado ou hidráulica) passem pelas vigas.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem o apoio financeiro concedido pela Capes.

REFERÊNCIAS

- Abaqus, 2010. ABAQUS/Standard Version 6.10-1. Dassault Systemes S.A.,
- Abaqus, 2012. Scripting User's Manual. Dassault Systemes S.A., http://www.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/pdf_books/SCRIPT_USER.pdf
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Anexo I.
- Chung, F.K., Liu, C.H., & KO, A.C.H., 2001. Investigation on Vierendeel Mechanism in Steel Beams with Circular Opening. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, n. 5, pp. 467-490.
- Chung, F.K., Liu, C.H., & KO, A.C.H., 2003. Steel beams with large web opening of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interpretation curve. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, n. 9, pp. 1177-1200.
- Cook, R.D., 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. J. W Sons.
- Moen, C.D., 2009. Direct Strength Design of Cold-Formed Steel Members with Perforations. PhD thesis, Johns Hopkins University/Baltimore.
- Shanmugam, N., Lian, V., & Thevendran, V., 2002. Finite Element Modeling of Plate Girdes with Web Opening. *Thin-Wall Structures*, vol. 40, n. 5, pp. 443-464.