

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



João José Venel Braga

**Estabilidade de Vigas de Aço
com Furos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a Elisa Dominguez Sotelino

Rio de Janeiro
Novembro de 2015



João José Venel Braga

**Estabilidade de Vigas de Aço
com Furos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Elisa Dominguez Sotelino

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de novembro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

João José Venel Braga

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2012. Trabalhou na área de projetos de estrutura de aço e concreto armado na empresa Chemtech. Desenvolveu junto a sua orientadora durante o Mestrado modelos de vigas de aço com furos.

Ficha Catalográfica

Braga, João José Venel

Estabilidade de Vigas de Aço com Furos/ João José Venel Braga; orientadora: Elisa Sotelino. – Rio de Janeiro:PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2015

153f.il.(color);30 cm

1.Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil Teses 2.Furos em Vigas de aço 3.Abertura em Alma 4.Estabilidade de Vigas 5.Viga Expandida 6.Viga Castelada 7.Viga Castelada Expandida Departamento de Engenharia Civil. I, Sotelino, Elisa Dominguez II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho a Vera Braga e João Batista
por serem as pessoas que mais me incentivaram
e acreditaram no meu potencial.

Agradecimentos

A Deus, por me dar força, coragem, sabedoria e saúde na jornada da vida e pelo começo de uma nova etapa.

Aos meus pais, João Batista e Vera e as minhas irmãs, Thaisa e Thaís.

A minha avó Teresa, que partiu para junto do Pai, por ser a responsável pela pessoa que sou hoje.

A minha orientadora, professora Elisa Sotelino, pelo incentivo, motivação e orientação não somente relativo a esta dissertação, como também acadêmico-profissional.

Aos professores e funcionários da PUC-Rio, pelos conhecimentos e auxílio sempre que necessário.

Aos amigos do curso de Mestrado por todo o convívio e ajuda nos momentos difíceis no período dos créditos e na elaboração desta dissertação (Rafael, Carlos, Joaquin, Kenny, César, Raquel, Murilo e Gustavo).

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a execução dessa Dissertação de Mestrado.

A CAPES e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos durante o curso de mestrado.

Resumo

Braga, João José Venel; Sotelino, Elisa Sotelino. **Estabilidade de Vigas de Aço com Furos**. Rio de Janeiro, 2015. 153p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho investiga a estabilidade de vigas de aço devido à presença de furos através de um modelo elástico. Quando se utiliza estruturas de aço em edificações, grandes vãos são cada vez mais comuns, 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 e etc., evita um acréscimo na altura do furo e conseqüentemente no pé direto, propiciando reduções de custos. Contudo, em decorrência da utilização de furos em vigas há uma diminuição na capacidade resistente e no momento crítico desses elementos estruturais. Esse trabalho foi dedicado a investigação da estabilidade de vigas de aço devido à presença de furos. Na primeira parte desse trabalho, estudos numéricos com aplicação do método dos elementos finitos foram realizados investigando três tipos de furos: circulares, retangulares e hexagonais. Também foi estudado o efeito de mais de um furo em vigas no meio do vão das mesmas. Ao final, foi estudado o efeito do tamanho do furo, sendo analisado duas medidas; furos pequenos e grandes. Na segunda parte desse trabalho foram estudados diferentes tipos de métodos de fabricação de vigas com furos; vigas com recorte do furo na alma por plasma, vigas expandidas, vigas casteladas e vigas casteladas expandidas. Sendo a viga castelada a que apresentou os melhores resultados no que se refere aos momentos críticos. Por último, os resultados obtidos foram comparados com outro trabalho que estudou a influência dos modos de falhas provocados pela flexão e pelo mecanismo de Vierendeel. Concluiu-se que para a grande maioria dos casos, a pior situação, ou seja, a situação que realmente irá acontecer na prática, não será a perda de estabilidade. Contudo, para um dos casos das vigas casteladas expandidas o momento crítico foi menor,

indicando que o fenômeno de instabilidade também pode ocorrer para algumas configurações de vigas com furos.

Palavras-chave

Furos em Vigas de Aço; Abertura em Almas; Estabilidade de Vigas; Viga Expandida; Viga Castelada; Viga Castelada Expandida.

Abstract

Braga, João José Venel; Sotelino, Elisa Sotelino (advisor). **Stability of Beams with holes**. Rio de Janeiro, 2015. 153p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation addresses the stability of steel beams with web opening through an elastic buckling analysis. Steel constructions and composite constructions for buildings often employ beams and girders with long spans, offering service room in one direction only. The use of web opening for passage of service ducts avoid increasing the ceiling height of the construction. On the other hand, web opening reduces the flexural and shear resistances and critical moment of the beam. Numerical studies by the finite element method were performed to investigate the stability of these beams. Three different kind of holes were considered, namely: circular, rectangular and hexagonal. Besides that the influence of more than one hole and the influence of two different sizes of holes were investigated. A study of holes performed by plasma cutting and the study of expanded beam, castellated beam and expanded castellated beam. In conclusion from this study, the beam with the higher critical moment was the castellated beam. Finally, the results from all this studies was compared with other study performed by a different author, which studied flexural and Vierendeel failure. The conclusion from this last study shows that from the majority of cases, the worse condition was not the instability but also the flexural and Vierendeel failure. However, from one of the cases of the expanded castellated beam the critical moment was lower. Thus, this indicate that for some cases the instability can occur.

Keywords

Beams with holes; Web-opening; Beams stability; Castellated beams; Expanded beams; Expanded Castellated beams.

Sumário

1. Introdução	22
1.1. Motivação	22
1.2. Objetivos	24
1.3. Estrutura do trabalho	24
2 Revisão de Conceitos Relevantes	26
2.1. Vigas de Alma cheia	26
2.1.1. Considerações gerais	26
2.1.2. Dimensionamento à flexão	26
2.2. Flambagem de placas	35
2.3. Vigas com furos na alma	38
2.3.1. Vigas casteladas	39
2.3.2. Viga Expandida	45
3 Revisão bibliográfica	48
3.1. Aberturas em vigas de aço	48
3.1.1. Síntese de trabalhos	48
3.2. Trabalhos relacionados	58
3.2.1. Wissmann	59
3.2.2. Moen & Schafer	62
3.2.3. Análise de placa com um furo oblongo	64
4 Modelagem numérico computacional	71
4.1. Modelagem por elementos finitos	71
4.1.1. Seleção dos elementos finitos a serem utilizados	71
4.1.2. Estudo da precisão e convergência do modelo em elementos finitos	72
4.1.3. Modelo das vigas de aço com furo no Abaqus	74
4.2. Abaqus Scripting Interface	75
4.3. Modelagem do furo no Abaqus	76
4.4. Modelo estrutural	78
4.5. Condições de contorno e carregamento	80

4.6. Validação do modelo numérico computacional	81
4.6.1. Ensaio de Schudlich & Heyden	81
4.6.2. Modelo em elementos finitos	84
4.6.3. Comparação entre os resultados do modelo numérico e do experimental	85
5 Estudo computacional do comportamento de vigas com furos	89
5.1. Estudo de vigas sem furo	90
5.2. Estudo de vigas com um único furo circular	93
5.3. Estudo comparativo de vários tipos de furos em vigas com um furo	98
5.4. Estudo de viga com mais de um furo	101
5.5. Estudo comparativo do tamanho do furo nas vigas	105
6 Estudo de vigas com diferentes tipos de fabricação de furos	119
6.1. Estudo Preliminar	119
6.2. Viga Expandida com três aberturas	125
6.3. Viga Castelada	129
6.4. Viga Castelada Expandida	133
6.5. Comparação da Viga Castelada e Viga Castelada Expandidas com a Viga Expandida	136
6.6. Comparação do Momento Crítico com os resultados de Wissmann	137
7 Conclusão	140
7.1. Trabalhos Futuros	142
8 Referências Bibliográficas	144
Anexo A – Dimensões da seção transversal e locação dos furos do ensaio de Schudlich & Heyden [22].	146
Anexo B – Relação dos momentos críticos de todos os estudos feitos nesse trabalho	147

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Representação das dimensões ajustáveis na fabricação de viga celular, adaptado de [1]	22
Figura 1.2 - Passagens de tubulação em aberturas de vigas de aço [1]	23
Figura 2.1 - Viga biapoiada sob carga uniformemente distribuída crescente [5]	27
Figura 2.2 - Momento de início de plastificação e momento de plastificação total, adaptado de [5]	28
Figura 2.3 - Comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta, adaptado de [5]	30
Figura 2.4 - Notações utilizadas para efeito de flambagem local sobre a resistência à flexão de vigas I ou H com um ou dois eixos de simetria, adaptado de [5]	30
Figura 2.5 - Variação do momento resistente nominal de vigas I ou H, carregadas no plano da alma, com efeito de flambagem local da mesa ou da alma (admite-se a contenção lateral que elimina a flambagem lateral), adaptado de [5]	32
Figura 2.6 - Flambagem local da mesa comprimida em vigas I fletidas no plano da alma.[5]	35
Figura 2.7 - Placa sujeita a uma carga compressiva, adaptado de [7]	35
Figura 2.8 - Tensão crítica para uma placa simplesmente apoiada sujeita à uma carga compressiva, adaptado de [7]	36
Figura 2.9 - Forma flambada de uma placa sujeita à uma carga compressiva ($a/b=2$), adaptado de [7]	38
Figura 2.10 - Configurações geométricas mais comuns de aberturas na alma [1]	39
Figura 2.11 - Corte na alma em padrão trapezoidal [1]	40
Figura 2.12 - Resultado final do transpasse e solda [1]	40
Figura 2.13 - Transpasse, solda e sobra na viga castelada	40
Figura 2.14 - Ilustração do dimensionamento de uma viga Litzka [8]	41
Figura 2.15 - Fabricação de viga celular (duas linha de corte) [1]	42
Figura 2.16 -Fabricação automatizada da viga celular [9]	43

Figura 2.17 - Aberturas alongadas e sua flexibilidade [10]	43
Figura 2.18 - Viga castelada com inércia variável (formato cônico) [9]	44
Figura 2.19 - Viga Angelina [11]	45
Figura 2.20 - Corte da viga original e da chapa de expansão [1]	46
Figura 2.21 - Resultado da viga expandida [1]	46
Figura 2.22 - Viga castelada expandida [1]	47
Figura 3.1 - Localização das rótulas plásticas Redwood [2]	49
Figura 3.2 - Mecanismo de Vierendeel no entorno de uma abertura circular, Chung et al [10]	50
Figura 3.3 - Configurações geométricas das aberturas na alma, [10]	52
Figura 3.4 - Malha de elementos finitos trabalhada [14]	55
Figura 3.5 - Painéis com aberturas circulares [14]	55
Figura 3.6 - Painéis com aberturas retangulares [14]	56
Figura 3.7 - Carga última versus tamanho da abertura (furo circular) [14]	57
Figura 3.8 - Curvas de resistência da viga formada pelo perfil W250	60
Figura 3.9 - Modelo da viga original com três aberturas alongadas formadas pelo perfil W200	60
Figura 3.10 - Representação da viga expandida com chapa de expansão em vermelho, adaptado de [1]	61
Figura 3.11 - Modelo de viga castelada tipo Litzka para o perfil W200 [1]	61
Figura 3.12 - Modelo da viga Litzka expandida com três abertura octogonais com a chapa de expansão em vermelho [1]	62
Figura 3.13 - Representação da coluna estudada por Moen com um furo oblongo no meio de seu comprimento e seus modos de flambagem típicos, adaptado de [17]	63
Figura 3.14 - Representação 3D da viga estudada por Moen com vários furos oblongos ao longo de seu comprimento, adaptado de [17]	63
Figura 3.15 - Definição das dimensões da placa com furo, adaptado de [17]	64
Figura 3.16 - Definição das “Faixas” A e B para placas com furos, adaptado de [17]	65

Figura 3.17 - Condições de contorno e carregamento para a placa com furo, adaptado de [17]	65
Figura 3.18 - Influência de um furo oblongo na flambagem elástica de uma placa retangular para diferentes comprimentos de placa [17]	66
Figura 3.19 - Comparação da deformada e para uma placa retangular com $h_{hole}/h = 0,66$ e $L/L_{hole} = 3$, (a) com furo oblongo e (b) sem furo [17]	67
Figura 3.20 – (a) Furo oblongo provocando flambagem local ($h_{hole}/h = 0,26$), comparado a (b) ao comprimento de ondas natural na sua configuração natural [17]	67
Figura 3.21 - Definição dos espaçamentos dos furos oblongos [17]	68
Figura 3.22 - Influência do espaçamento dos furos oblongos na tensão crítica de uma placa retangular longa simplesmente apoiada [17]	69
Figura 3.23 - Comparação das deformadas para placas longas com furo ($L=24 L_{hole}$) com furo oblongo espaçado de $S/L_{hole} < 4$ e $h_{hole}/h = 0,66; 0,44$ e $0,26$, adaptado de [17]	70
Figura 4.1 - S4/S4R, elemento de casca com quatro nós e funções lineares; S9R5, elemento de casca com 9 nós e função de interpolação quadrática; S8R5, elemento com 8 nós e função de interpolação quadrática	72
Figura 4.2 – Comparação das tensões críticas de uma placa simplesmente apoiada sujeita a uma tensão compressiva obtida analiticamente e por meio do Abaqus, adaptado de [17]	74
Figura 4.3 - Simplificação na definição da geometria da viga, a altura da alma foi acrescentada da espessura da mesa a fim de conectar esses dois elementos.	75
Figura 4.4 - Discretização do furo usando elemento S9R5 (também vale para elemento S8R5), adaptado de [17]	77
Figura 4.5 - a) Malha de elementos finitos da viga com furo circular (com a razão de aspecto de 8:1 para elementos longe do furo), b) retangular (com a nomenclatura das dimensões do furo) e c)	

hexagonal. Além disso, também é possível visualizar os (d) detalhes das malhas na alma e nas mesas	77
Figura 4.6 - a) Exemplo do modelo estrutural utilizado no trabalho sem um trecho da laje b) Esquema das vigas principais e secundárias c) Viga principal castelada com furos hexagonais (Litzka) carregada em um terço e dois terços do seu comprimento	79
Figura 4.7 – Condições de contorno de uma viga com furo	80
Figura 4.8 - Notação da seção transversal e da medida dos furos [22]	82
Figura 4.9 – Notação da posição do furo, adaptado de [22]	82
Figura 4.10 – Configuração do ensaio, adaptado de [22]	83
Figura 4.11 – Ponto de carregamento, adaptado de [22]	83
Figura 4.12 - Condições de contorno	85
Figura 4.13 - (a) Restrições utilizadas para modelar o perfil tubular retangular (HSS) utilizado para unir os dois perfis C e o (b) detalhe das ligações rígidos	85
Figura 4.14 - Modo de flambagem elástico da viga com furo (MCR= 11,76 kNm)	87
Figura 4.15 - Progresso de passo de carga para a viga com furo (a) M=0kNm, (b) M=10,34kNm (pico do carregamento) e (c) depois do colapso M=4,43kNm, adaptado de [22]	87
Figura 4.16 - Flambagem local na alma para a viga sem furo (MCR=14,61kNm)	88
Figura 4.17 - Progresso de passo de carga para a viga sem furo (a)M=0kNm, (b) M=12,71kNm (pico do carregamento) e (c) depois do colapso M=5,23kNm, adaptado de [22]	88
Figura 5.1 - Notação das dimensões dos perfis	90
Figura 5.2 - Modos de flambagem das vigas sem furo dos perfis (a) W250 e (b) W410	92
Figura 5.3 - Modos de flambagem das vigas sem furo dos perfis (a) W530 e (b) W610	93
Figura 5.4 – 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 ($M_{CR_1F_CONF.2}$)	96

Figura 5.5 - Modo de flambagem das vigas com um furo circular formadas pelos perfis (a) W200 e (b) W360	97
Figura 5.6 - Modo de flambagem das vigas com um furo circular formadas pelos perfis (a) W460 e (g) W610	98
Figura 5.7– Três tipos de furos estudados no trabalho (a) circular, (b) retangular e (c) hexagonal. Sendo as dimensões dos parâmetros indicados na Tabela 5.4 e Tabela 5.5	99
Figura 5.8 – 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	101
Figura 5.9 – 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.	101
Figura 5.10 – 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.	103
Figura 5.11 – 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.	103
Figura 5.12 - Modo de flambagem das vigas com dois furos circulares (configuração 1) formadas pelos perfis (a) W200 e (b) W360	104
Figura 5.13 - Modo de flambagem das vigas com dois furos circulares (configuração 1) formadas pelos perfis (a) W460 e (b) W610	105
Figura 5.14 - Comparação entre os modos de flambagem entre os elementos da configuração 1 e 2 para as vigas com um furo circular formadas pelo perfil W360	107
Figura 5.15 - Comparação entre os modos de flambagem entre os elementos da configuração 1 e 2 para as vigas com um furo circular formadas pelo perfil W530.	108
Figura 5.16 - Comparação entre os modos de flambagem entre os elementos da configuração 1 e 2 para as vigas com um furo circular para o perfil W410.	110

Figura 5.17 - Comparação entre os modos de flambagem entre os elementos da configuração 1 e 2 para as vigas com um furo retangular para o perfil W410.	111
Figura 5.18 - Comparação entre os modos de flambagem entre os elementos da configuração 1 e 2 para as vigas com um furo hexagonal para o perfil W410.	112
Figura 5.19 - Gráfico comparativo do momento crítico da viga com um furo circular pequeno ($M_{CR_CIR1_CONF1}$) e grande ($M_{CR_CIR1_CONF2}$)	114
Figura 5.20 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com dois furos circulares pequenos ($M_{CR_CIR2_CONF1}$) e grandes ($M_{CR_CIR2_CONF2}$)	114
Figura 5.21 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com três furos circulares pequenos ($M_{CR_CIR3_CONF1}$) e grandes ($M_{CR_CIR3_CONF2}$)	115
Figura 5.22 - Gráfico comparativo do momento crítico da viga com um furo retangular pequeno ($M_{CR_RET1_CONF1}$) e grande ($M_{CR_RET1_CONF2}$)	115
Figura 5.23 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com dois Furos retangulares pequenos ($M_{CR_RET2_CONF1}$) e grandes ($M_{CR_RET2_CONF2}$)	116
Figura 5.24 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com três furos retangulares pequenos ($M_{CR_RET3_CONF1}$) e grandes ($M_{CR_RET3_CONF2}$)	116
Figura 5.25 - Gráfico comparativo do momento crítico da viga com um furo hexagonal pequeno ($M_{CR_HEX1_CONF1}$) e grande ($M_{CR_HEX1_CONF2}$)	117
Figura 5.26 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com dois furos hexagonais pequenos ($M_{CR_HEX2_CONF1}$) e grandes ($M_{CR_HEX2_CONF2}$)	117
Figura 5.27 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas com três furos hexagonais pequenos ($M_{CR_HEX3_CONF1}$) e grandes ($M_{CR_HEX3_CONF2}$)	118

Figura 6.1 – (a) Comparação dos modos de flambagem das vigas com um furo (configuração 3) e (b) e com três furos (configuração 4), formadas pelo perfil W310	122
Figura 6.2 - (a) Comparação dos modos de flambagem das vigas com um furo (configuração 3) e (b) e com três furos (configuração 4), formadas pelo perfil W410	123
Figura 6.3 - Configuração da viga com três furos alongados (configuração 5)	124
Figura 6.4 - Gráfico comparativo do momento crítico da viga com um furo pequeno ($M_{CR_1F_CONF3}$), três furos pequenos ($M_{CR_3F_CONF4}$) e três furos alongados ($M_{CR_3F_CONF5}$)	125
Figura 6.5 - Configuração da viga expandida, onde pode ser observada a chapa de expansão (vermelho), perfis “tês” (verde) e as aberturas longas	125
Figura 6.6 – (b) Comparação dos modos de flambagem das vigas originais com três furos longos (configuração 5) com os (a) modos de flambagem das vigas expandidas formadas pelos perfis W200	127
Figura 6.7 - (b) Comparação dos modos de flambagem das vigas originais com três furos longos (configuração 5) com os (a) modos de flambagem das vigas expandidas formadas pelos perfis W310	128
Figura 6.8 -Gráfico comparativo do momento crítico da viga original com furos longos ($M_{CR_3F_CONF5}$), viga expandida (M_{CR_EXP}) e viga original sem furos (M_{CR_SF})	129
Figura 6.9 - Exemplicação de uma viga castelada qualquer, onde pode ser visualizado o comprimento original (LO), comprimento final (LF) e as perdas (P) provocadas em decorrência do processo de fabricação	131
Figura 6.10 -Modos de flambagem das viga casteladas formadas pelos perfis (a) W200 e (b) W360	132
Figura 6.11 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas casteladas que flabaram para os modos LWH ($M_{CR_CAST_LWH}$), LWHS da viga castelada ($M_{CR_CAST_LWHS}$) e da viga original sem furo (M_{CR_SF})	133

Figura 6.12 - Configuração da viga castelada expandida, onde pode ser observada a chapa de expansão (vermelho), os perfis “tês” castelados (verde), abertura octogonal e abertura trapezoidal	134
Figura 6.13 - Modos de flambagem da viga castelada expandida formada pelos perfis (a) W200 e (b) W310	135
Figura 6.14 - Gráfico comparativo do momento crítico da viga castelada expandida ($M_{CR_CAST_EXP}$), viga castelada (M_{CR_CAST}) e viga original sem furo (M_{CR_SF})	136
Figura 6.15 - Gráfico Comparativo do momento crítico da viga castelada (M_{CR_CAST}) e viga castelada expandida ($M_{CR_CAST_EXP}$) com o momento crítico da viga expandida (M_{CR_EXP})	137
Figura 6.16 - Gráfico comparativo do momento crítico das vigas expandidas (M_{CR_EXP}), casteladas (M_{CR_CAST}), casteladas expandidas ($M_{CR_CAST_EXP}$) e do momento máximo obtido por Wissmann para as vigas expandidas (M_{MAX_EXP}), casteladas (M_{MAX_CAST}), casteladas expandidas ($M_{MAX_CAST_EXP}$) da viga original sem furos (M_{MAX_SF})	139

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores limites da relação largura-espessura de seções I ou H	31
Tabela 2.2 - Momento nominal (M_n) [5]	32
Tabela 3.1 - Perfis e dimensões utilizados no trabalho desenvolvido por Wissmann [1]	59
Tabela 3.2 - Largura das placas correspondentes ao perfil “C” utilizado	64
Tabela 4.1 – Momento crítico obtido experimentalmente e através do Abaqus	86
Tabela 5.1 – Perfis utilizados no trabalho e suas dimensões	89
Tabela 5.2 - Momento crítico viga sem furo	91
Tabela 5.3 – Esbeltez da mesa e da alma dos perfis estudados nesse trabalho que fazem parte da serie de perfis estruturais I produzidos pela Gerdau [23]	91
Tabela 5.4– Dimensões dos furos configuração 1 (furos pequenos)	99
Tabela 5.5– Dimensões dos furos configuração 2 (furos grandes)	100
Tabela 5.6 – Parâmetro de flambagem (L_{HOLE}/L_A) do furo retangular	113
Tabela 5.7 – Parâmetro de flambagem (L_{HOLE}/L_A) do furo hexagonal	113
Tabela 6.1 – Comprimentos dos vãos e posições das três aberturas	120
Tabela 6.2 - Dimensões dos furos nas vigas com três furos alongados (configuração 5)	124
Tabela 6.3 - Informações da geometria das aberturas e das dimensões das vigas casteladas	130

Lista de Símbolos

NBR 8800: Norma Brasileira de projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios

AISC: American Institute of Steel Construction

$\sigma_{máx}$: Tensão máxima

I : Momento de inércia da seção em torno do eixo de flexão.

$y_{máx}$: Distância ao centroide do elemento de área mais afastado

W : Módulo elástico da seção

Z: Módulo plástico da seção

M_{PL} : Momento de plastificação da seção

M_Y : Momento de início de plastificação

M_R : Momento resistente

G: Centroide

M_{MAX} : Momento máximo

λ : Índice de esbeltez

λ_p : Índice de esbeltez seção compacta

λ_r : Índice de esbeltez seção esbelta

t_f : Espessura mesa

t_w : Espessura da alma

b_f : Largura da mesa

h_f : Altura da alma

h : Altura total da viga

E: Módulo de elasticidade

f_Y : Tensão limite de escoamento

M_n : Momento resistente nominal

Q : Coeficiente de redução de flambagem local elástica

ν : Coeficiente de Poisson

H : Altura total viga castelada expandida tipo Litzka

h_{hole} : Altura do furo

L_{hole} : Comprimento do furo

S : Espaçamento entre furos

h_A : Faixa ente o furo e a borda superior da viga

h_B : Faixa entre o furo e a borda inferior da viga

$S4$: Elemento de casca com 4 nós

$S4R$: Elemento de casca com 4 nós e integração reduzida

$S8R$: Elemento de casca com 8 nós e integração reduzida

$S9R5$: Elemento de casca com 9 nós, integração reduzida e cinco graus de liberdade por nó

$S8R5$: Elemento de casca com 8 nós, integração reduzida e cinco graus de liberdade por nó

NH : Exemplar sem furo

$H0.9$: Exemplar com inércia líquida sobre inércia bruta de 0,9

LF : Flambagem local de mesa

LW : Flambagem local de alma

$LF + LW$: Combinação da flambagem local da mesa e da alma

LFH : Flambagem local da mesa localizada na posição do furo

LWH : Flambagem local da alma localizada na posição do furo

$LWHS$: Flambagem local na alma devido ao cisalhamento na posição do furo