

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Jorge Augusto Wissmann**

**Estudo de Vigas de Aço com Aberturas de Alma  
Tipo Alveolar, Litzka e Vigas Expandidas em  
Altura**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Sebastião Arthur Lopes de Andrade



**Jorge Augusto Wissmann**

**Estudo de Vigas de Aço com Aberturas de Alma  
Tipo Alveolar, Litzka e Vigas Expandidas em  
Altura**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Pendente de Aprovação pela Comissão Examinadora abaixo.

**Sebastião Arthur Lopes de Andrade**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco**

Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

**José Guilherme Santos da Silva**

Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

**Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Setembro de 2009

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

**Jorge Augusto Wissmann**

Graduou-se em Engenharia Civil na UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná). Na UNIOESTE, participou de programas de Iniciação Científica na área de Engenharia Civil. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em Estudos Numéricos em Vigas de Aço com Aberturas na Alma.

Ficha Catalográfica

Wissmann, Jorge Augusto

Estudo de vigas de aço com aberturas de alma tipo alveolar, Litzka e vigas expandidas em altura / Jorge Augusto Wissmann ; orientador: Sebastião Arthur Lopes de Andrade. – 2009.

139 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Análise pelo método dos elementos finitos. 3. Mecanismo de Vierendeel. 4. Abertura na alma. 5. Curvas de interação flexão-cisalhamento. 6. Não linearidade física e geométrica. 7. Vigas de aço. 8. Vigas expandidas. 9. Análise paramétrica. I. Andrade, Sebastião A. L. de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais e toda minha  
família, pelo amor e apoio.

## Agradecimentos

Aos meus pais e minha família, pelo apoio a minha escolha em dedicar mais alguns anos aos estudos, sem poderem contar com meu apoio próximo em uma época de problemas.

A Édina Michelli Allebrandt, que esteve ao meu lado durante esse período, apoiando e escutando nos momentos de necessidade.

Aos professores Fábio Luiz Willrich e Humberto Correia Lima Júnior pelo apoio e recomendação ao início do mestrado.

A Dilnei Schmidt, colega e amigo, pela dedicação de seu tempo ao me ensinar a como utilizar o software de elementos finitos. Sem sua ajuda a pesquisa teria sido comprometida.

A Arthur Medeiros, João Soto Krause e Paul Antezana que durante toda a convivência desta época foram mais que colegas, se tornaram amigos também.

A Sebastião Arthur Lopes de Andrade, orientador da presente dissertação, que protagonizou seu papel direcionando leituras e autores, guiando pensamentos e idéias, assim como auxiliando em momentos de necessidade intelectual durante nossos encontros.

As agências de fomento CNPq e CAPES, que propiciaram condições financeiras, sem as quais a pesquisa e a obtenção do título de mestrado não seriam possíveis.

## Resumo

Wissmann, Jorge Augusto.; Andrade, Sebastião Arthur Lopez. **Estudo de Vigas de Aço com Aberturas de Alma Tipo Alveolar, Litzka e Vigas Expandidas em Altura**. Rio de Janeiro, 2009. 136p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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 portanto 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 há uma grande diminuição da capacidade resistente nestes elementos estruturais que dependem diretamente da forma, do tamanho e da posição destas aberturas. A presente dissertação descreve alguns métodos construtivos de aberturas em almas de vigas de aço, cálculos de dimensionamentos e normas relacionadas. Alguns estudos numéricos com aplicações do método dos elementos finitos foram realizados investigando: angulação de aberturas hexagonais, vigas com três aberturas nos terços médios, vigas casteladas (tipo Litzka, com quantidades diferentes de aberturas), vigas expandidas em altura e uma viga Litzka Expandida. Para tal, utilizou-se de seis perfis de uso prático e comparando-os entre estas alternativas descritas. A viga Litzka Expandida se destacou em resistência quando comparada com outros métodos de fabricação, como também pelo menor peso linear, praticidade na fabricação e posicionamento das aberturas.

### Palavras-chave

Análise pelo método dos elementos finitos; Mecanismo de Vierendeel; Abertura na alma; Curvas de interação flexão-cisalhamento; Não linearidade física e geométrica; Vigas de aço, Vigas casteladas, Vigas alveolares, Vigas Litzka, Vigas Expandidas, Viga Litzka Expandida, Análise paramétrica.

## Abstract

Wissmann, Jorge Augusto.; Andrade, Sebastião Arthur Lopez (advisor). **Study of Steel Beams with Web Openings Including Cellular, Litzka and Depth-Expanded Beams**. Rio de Janeiro, 2009. 136p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

More slender structures are used in order to reduce costs, floors depth and floor to ceiling clear heights. Steel construction and composite construction for buildings often employs long spans for beams and girders, offering service room between beams in one direction only. The use of web openings for passage of service ducts avoids increasing the depth of construction. Beams with web openings have reductions on flexural and shear resistances depending on the geometry, size and position of such openings on the beam. This dissertation presents some construction methods of beam web openings, analysis and design recommendations, related standards and codes. Some numerical studies by the finite elements method were carried out and results are presented for: type of openings, number and spacing of openings, castellated beams (Litzka type and non-uniform distribution of openings) and expanded in depth beams. For this purpose, six commonly used profiles were used for testing the described web openings solutions. Some comparison results are presented. The Litzka type of web expanded beam presented the best performance in terms of strength, easy of fabrication and reduction of material costs.

### Keywords

Finite Element Analysis; Vierendeel Mechanism; Web Opening; Moment-shear Interaction Curves; Material and Geometrical Non-linearity; Steel Beams, Castellated Beams, Cellular Beams, Litzka Beams, Depth-expanded Beams, Litzka Depth-expanded Beams, Parametric Analysis.

## Sumário

1 Introdução	20
1.1. Motivos e Utilizações	20
1.2. Objetivo	21
1.3. Organização do Trabalho	22
2 Revisão Bibliográfica	23
2.1. Aberturas em Vigas de Aço	23
2.1.1. Formas e Variações	25
2.1.1.1. Tipos	25
2.1.1.2. Aberturas Alongadas	26
2.1.1.3. Excentricidade	27
2.1.2. Viga Castelada	27
2.1.2.1. Viga Litzka (Peiner)	28
2.1.2.2. Viga Celular	30
2.1.2.2.1. Vigas de Inércia Variável	31
2.1.2.3. Viga Angelina	32
2.1.3. Viga Expandida	33
2.1.4. Comparações entre aberturas	34
3 Análise dos Esforços	36
3.1. Esforços no Entorno da Abertura	36
3.2. Modos de Falhas	45
3.2.1. Flexão	46
3.2.2. Cisalhamento	46
3.2.3. Mecanismo de Vierendeel	46
3.2.4. Flambagem Local da Mesa Comprimida	47
3.2.5. Flambagem Local da Alma	48
3.3. Reforços Estruturais	48

3.4. Procedimentos de Dimensionamento	50
3.4.1. Aberturas sem Reforço	50
3.4.1.1. Excentricidade	63
3.4.2. Aberturas Reforçadas	67
3.5. Normas	70
4 Modelo Numérico Computacional	73
4.1. Introdução	73
4.2. Elemento Finito	73
4.3. Malha	74
4.4. Hipóteses Simplificadoras	76
4.5. Software Ansys	76
4.6. Análise Paramétrica	77
4.7. Geometria dos Modelos de Validação	77
4.8. Validação do Modelo	80
5 Estudo Computacional	82
5.1. Abordagem Local de Redwood	82
5.2. Estudo Paramétrico	84
5.2.1. Angulação de Abertura Hexagonal Isolada	86
5.2.2. Estudo de Perfis	94
5.2.2.1. Vigas Originais	96
5.2.2.2. Viga Original com Três Aberturas	97
5.2.2.3. Viga Expandida com Três Aberturas	104
5.2.2.4. Viga Litzka	107
6 Viga Litzka Expandida	109
6.1.1. Litzka Expandida Alongada	112
6.1.2. Padrão de Comparação Litzka Expandida	116
6.2. Comparações com Resultados Anteriores	117
6.2.1. Variações para o perfil W200	118
6.2.2. Variações para o perfil W250	119
6.2.3. Variações para o perfil W310	120
6.2.4. Variações para o perfil W360	121

6.2.5. Variações para o perfil W410	122
6.2.6. Variações para o perfil W460	123
7 Considerações Finais	125
7.1. Introdução	125
7.2. Resultados Alcançados	125
7.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	127
8 Referências Bibliográficas	128
Anexo A – Curvas de Interação Flexão-cisalhamento	132
Anexo B – Exemplos de Dimensionamento	137

## Listas de Figuras

Figura 1.1- Representação da flexibilidade na fabricação de viga castelada	20
Figura 1.2 - Passagens de tubulações em aberturas de vigas de aço [24]	21
Figura 2.1 - Centro de Convenções World Trade Center, São Paulo [18]	23
Figura 2.2 - Pórtico de Catálogo da Gerdau Açominas [12]	24
Figura 2.3 - Configurações geométricas mais comuns de aberturas na alma	25
Figura 2.4 - Abertura alongada e sua flexibilidade [5]	26
Figura 2.5 - Abertura circular alongada aparelhada para ensaio [19]	26
Figura 2.6 - Representação de viga celular com excentricidade	27
Figura 2.7 - Corte na alma em padrão trapezoidal	27
Figura 2.8 – Resultado final do transpasse e solda	28
Figura 2.9 Ensaio de viga castelada [21]	28
Figura 2.10 - Ilustração do dimensionamento de uma viga Litzka [11]	29
Figura 2.11 - Fabricação de viga celular (duas linhas de corte)	30
Figura 2.12 - Fabricação automatizada da viga celular [19]	31
Figura 2.13 - Transpasse, solda e sobra ( <i>scrap</i> )	31
Figura 2.14 - Tapered ACB Beam [19]	32
Figura 2.15 - Viga Angelina [2]	32
Figura 2.16 - Corte da viga original e da chapa de expansão	33
Figura 2.17 - Resultado da viga expandida	33
Figura 2.18 - Viga Castelada expandida	34
Figura 2.19 - Comparativo de seções de aberturas [1]	35
Figura 3.1 - Ilustração dos “tês” e das variáveis utilizadas por Redwood [15]	36
Figura 3.2 - Localização das rótulas plásticas Redwood [15]	38
Figura 3.3 - Distribuição de forças na seção perfurada [5]	39
Figura 3.4 - Mecanismo de Vierendeel no entorno de uma abertura circular, Chung <i>et al</i> [6]	40
Figura 3.5 - Exemplo de curvas de interação flexão-cisalhamento obtidas por investigações em elementos finitos [5]	42
Figura 3.6 - Formas e variáveis das aberturas estudadas por Chung <i>et al</i> [5]	43

Figura 3.7 - Redução na curva de interação flexão-cisalhamento de uma seção perfurada devido ao mecanismo de Vierendeel [5]	47
Figura 3.8 - Tipos de Reforço para Aberturas na Alma - Redwood [15]	49
Figura 3.9 - Região adicional considerada em um “T”, dada pela mesa da viga [5]	51
Figura 3.10 - Curvas de interação flexão-cisalhamento propostas [5]	56
Figura 3.11 - Valores típicos do parâmetro Vierendeel para um perfil UB 457x152x52 S275 [5]	57
Figura 3.12 - $v_i$ , $v$ e $m$ das seções perfuradas ao longo do vão da viga. Perfil UB 457x152x52 S275 [5]	59
Figura 3.13 - Análise dos esforços assumindo plastificação, Redwood [15]	60
Figura 3.14 - Diagrama de interações momento-cortante para o perfil IPE550	63
Figura 3.15 - Abertura circular excêntrica sujeita a momento e cortante, Redwood [15]	64
Figura 3.16 - Detalhes e notações da abertura na alma utilizadas por Redwood e Shrivastava [17]	68
Figura 3.17 - Ilustração da “zona neutra” segundo Veríssimo [24]	71
Figura 3.18 - Condições para execução de aberturas circulares [3]	72
Figura 4.1 - Elemento <i>SHELL</i> 281, 8-Node <i>Finite Strain Shell</i> [10]	74
Figura 4.2 - Seqüência de modelagem representando linhas, áreas, malha de elementos carregamento	75
Figura 4.3 - Modelo elaborado para validação do estudo	75
Figura 4.4 - Detalhes da modelagem utilizada por Chung <i>et al</i> [6]	78
Figura 4.5 - Localização da abertura e da aplicação da carga, Viga3A	78
Figura 4.6 - Diagrama de momento fletor e representação de esforços em seções da Viga3A	79
Figura 4.7 - Solução Nodal de Tensões pelo critério de Von Mises, Viga3A	79
Figura 4.8 - Comparação da formação de rótulas plásticas conforme literatura	80
Figura 4.9 - Resultados obtidos por Chung [6] para vigas 2A e 3A	80
Figura 4.10 - Comparação com os ensaios Chung [6], obtidos através dos modelos criados para VIGA2A e 3A	81
Figura 5.1 - Curva de interação M-V para viga IPE550 com abertura 50% da altura da viga	82

Figura 5.2 - Curva de interação M-V para viga ipe550 com abertura 70% da altura da viga	83
Figura 5.3 - Variáveis utilizadas na presente pesquisa, forma hexagonal alongada	85
Figura 5.4 - Esboço dos esforços de momento fletor e esforço cortante respectivamente, nas aberturas da VIGA3A	86
Figura 5.5 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 762mm	87
Figura 5.6 – Distribuição de tensões Von Mises para os ângulos simulados das aberturas centradas a 762 mm do apoio esquerdo, com o comprimento total fixo	88
Figura 5.7 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 556 mm	88
Figura 5.8 - Rótulas plásticas desenvolvidas para cada ângulo simulado, a 556 mm do apoio e com o comprimento total fixo	89
Figura 5.9 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 350mm	90
Figura 5.10 - Nova configuração com o comprimento total da abertura	90
Figura 5.11 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 762 mm com 2a fixo	91
Figura 5.12 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 556 mm com 2a fixo	92
Figura 5.13 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 350mm com 2a fixo	93
Figura 5.14 – Rótulas plásticas desenvolvidas para cada ângulo simulado, a 350 mm do apoio e com o comprimento total variável	93
Figura 5.15 - Aplicação de deslocamentos nos terços e esforços	96
Figura 5.16 – Curvas de resistência dos perfis originais, sem aberturas	96
Figura 5.17 - Modelo da viga W200 com três aberturas, representação das áreas	98
Figura 5.18 – Curvas de resistência dos perfis originais com três aberturas para a tabela de configuração 1	99
Figura 5.19 - Viga W200 com três aberturas, tensão Von Mises em MPa, configuração 1	100

Figura 5.20 - Viga W200 com três aberturas, deformação plástica Von Mises, configuração 1	100
Figura 5.21 - Viga W460 com três aberturas, Von Mises Strain-Plastic, configuração 1	101
Figura 5.22 – Curvas de resistência dos perfis originais com três aberturas para a tabela de configuração 2	102
Figura 5.23 - Formação de rótulas plásticas para a viga W200 com três aberturas para a configuração 2	103
Figura 5.24 - Formação de rótulas plásticas para a viga W460 com três aberturas, configuração 2	103
Figura 5.25 - Representação da chapa de expansão em vermelho com outra espessura	104
Figura 5.26 - Simulação da viga W200 + chapa de 100 mm, com três aberturas, Von Mises Stress	104
Figura 5.27 – Curvas de resistência dos perfis com chapa de expansão e três aberturas para a configuração 1	105
Figura 5.28 – Curvas de resistência dos perfis mais chapa de expansão com três aberturas para a configuração 2	106
Figura 5.29 - Plastificação no lado de menor momento para perfil W250 para configuração 2	106
Figura 5.30 - Modelo de viga Litzka W200 (áreas), com 27 aberturas	107
Figura 5.31 – Curvas de resistência dos perfis em forma de viga Litzka	108
Figura 6.1 - Modelo de Viga Litzka Expandida demonstrando espessuras das chapas	109
Figura 6.2 Litzka expandida W200, tensões para configuração 1	110
Figura 6.3 Litzka expandida W200, tensões para configuração 2	110
Figura 6.4 Litzka expandida W250, tensões para configuração 3	111
Figura 6.5 Litzka expandida W360, tensões para configuração 4	111
Figura 6.6 – Curvas de resistência dos perfis Litzka Expandida	112
Figura 6.7 - Litzka Expandida W200 com quatro aberturas alongadas, configuração 5	112
Figura 6.8 Litzka expandida W200, deformações plásticas para configuração 5	113
Figura 6.9 - Litzka Expandida W200 com quatro aberturas alongadas, configuração 6	113

Figura 6.10 Litzka Expandida W200, deformações plásticas para configuração 6	114
Figura 6.11 - Configurações simuladas da viga Litzka Expandida W200	114
Figura 6.12 Litzka expandida W410, deformações plásticas para configuração 7	115
Figura 6.13 Litzka expandida W460, deformações plásticas para configuração 8	115
Figura 6.14 - Resistências das vigas Litzka Expandidas com aberturas alongadas	116
Figura 6.15 - Curvas de resistência dos perfis com dimensões de Litzka Expandida mas com alma cheia	117
Figura 6.16 – Curvas de resistência para as simulações do perfil W200	118
Figura 6.17 - Curvas de resistência para as simulações do perfil W250	119
Figura 6.18 - Curvas de resistência para as simulações do perfil W310	120
Figura 6.19 - Curvas de resistência para as simulações do perfil W360	121
Figura 6.20 - Curvas de resistência para as simulações do perfil W410	122
Figura 6.21 - Curvas de resistência para as simulações do perfil W460	123

## Listas de Tabelas

Tabela 3.1 - Aumento da resistência ao cisalhamento fornecido pela nova consideração da mesa [5]	52
Tabela 3.2 - Algumas relações de resistência dupla, $\bar{v}$ , para diferentes relações $\frac{d_0}{h}$ , examinadas por Chung <i>et al</i> [5]	53
Tabela 4.1 - Comparativo de resultados com Chung para Vigas 2A e 3A	81
Tabela 5.1 - Novos comprimentos totais das aberturas	91
Tabela 5.2 - Perfis estudados	94
Tabela 5.3 - Configurações das Vigas Litzka	95
Tabela 5.4 - Configuração um, para vigas com três aberturas	98
Tabela 5.5 - Configuração dois, para vigas com três aberturas	101
Tabela 6.1 – Peso dos perfis estudados com alma cheia mas com altura Litzka Expandida	117
Tabela B.1 - Esforços solicitantes em cada abertura do exemplo B.1	138
Tabela B.2 - Esforços solicitantes em cada abertura do exemplo B.2	139

## Lista de Símbolos

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$\alpha$  é o ângulo formado pela abertura hexagonal;

$2H$  é a altura vertical da abertura;

$2a$  é o comprimento da abertura ;

$d$  é a altura total do perfil;

$b$  é largura da mesa;

$w$  é a espessura da alma;

$t$  é a espessura da mesa;

$L$  é o comprimento da viga ;

$e$ chapa é a espessura da chapa de reforço;

$h$ chapa é a altura da chapa de expansão;

$H_{\text{final}}$  é a altura final do perfil modificado;

$N$  é o número de aberturas (para vigas Litzka).

## Abreviaturas

ACB – ArcelorMital Cellular Beam

AISC – American Institute of Steel Construction

APDL – Ansys Parametric Design Language

CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço

CSA - Canadian Standards Association

EC3– Eurocode 3

ECCS - European Convention for Constructional Steelwork

EN - European standard

ENV - European pre-standard

ENV - Eurocode - Version of Eurocode published by CEN as a pre-standard

ENV - (for subsequent conversion into EN)

HMS – High Moment Side (lado de maior momento)

LMS – Low Moment Side (lado de menor momento)

MEF – Método dos Elementos Finitos

UB – Universal Beam

Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.

**Albert Einstein**