

**FACULDADE DE CIÊNCIAS GERENCIAIS DE MANHUAÇU**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS CELULARES**

**EDUARDA ANDRADE ELLER**

**MANHUAÇU  
2015**

**EDUARDA ANDRADE ELLER**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS CELULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado no Curso Superior de  
Engenharia Civil na Faculdade de  
Ciências Gerenciais de Manhuaçu,  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Engenheiro Civil.

Área de Concentração: Estrutura  
Orientador: Márcio José Ottoni

**MANHUAÇU  
2015**

E454a Eller, Eduarda Andrade.  
Análise do desempenho estrutural de vigas celulares / *Eduarda Andrade Eller*. -- Manhuaçu, 2015.  
20f.

Otonni Monografia (Curso de Engenharia civil) – Orientador: Márcio José  
Centro Superior de Estudos de Manhuaçu - FACIG

1. Estruturas metálicas. 2. Vigas com alma expandida. 3.  
Vigas celulares.  
I. Título.

FACIG

CDD - 624.1821

## RESUMO

Com a crescente inovação na área da engenharia estrutural, principalmente no que se refere ao uso de elementos estruturais metálicos, tendo como objetivo reduzir o cronograma da obra, diminuir o peso da estrutura e alcançar vãos maiores com perfis de seção relativamente pequena, surgem opções como as vigas celulares, que além de proporcionar estas vantagens, possibilitam também a integração entre a estrutura e as instalações de serviço dos edifícios. Porém, a utilização destes elementos em estruturas de pequeno porte nem sempre é justificável, e muitas vezes, não é viável tanto do ponto de vista estrutural quanto do financeiro. Desta forma, surgem dúvidas sobre a viabilidade e a resistência destes elementos, bem como sua capacidade de resistir à solicitação de diferentes tipos de carregamento. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo orientar o engenheiro no momento de concepção estrutural, permitindo que ele compreenda as características mais relevantes a serem analisadas, ligadas à capacidade da estrutura, ao tipo de carga e ao possível modo de colapso no qual a estrutura estará suscetível.

**Palavras-chave:** estruturas metálicas; vigas com alma expandida; vigas celulares.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. DESENVOLVIMENTO .....	1
2.1. Referencial Teórico .....	1
2.1.1. A composição do aço .....	1
2.1.2. O uso do ferro e do aço como material de construção civil .....	2
2.1.3. Estados limites .....	4
2.1.4. Elementos estruturais com abertura na alma .....	5
2.1.4.1 Conceito .....	5
2.1.4.2. Geometria.....	5
2.1.5. Vigas celulares .....	8
2.1.5.1. Conceito .....	8
2.1.5.2. Processo de produção.....	10
2.1.5.3. Modos de colapso .....	11
2.1.5.3.1. Formação de mecanismo plástico .....	11
2.1.5.3.2. Ruptura da solda de emenda .....	12
2.1.5.3.3. Colapso da viga por flambagem lateral .....	13
2.1.5.3.4. Colapso do montante da alma.....	14
2.1.6. Análise de viabilidade.....	15
2.2. Metodologia.....	16
3. CONCLUSÃO.....	16
4. REFERÊNCIAS .....	17

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as tendências arquitetônicas e as exigências de mercado vêm levando a engenharia estrutural à busca de soluções cada vez mais arrojadas, que exigem experiência, conhecimento e confiança dos projetistas nos métodos construtivos e materiais empregados.

Nas últimas décadas, diversas normas internacionais destinadas ao dimensionamento de estruturas de aço têm estabelecido limites cada vez mais rigorosos para as flechas em vigas. Isso se deve ao fato de, frequentemente, na construção metálica, o dimensionamento das peças fletidas ser condicionado por limitações do seu estado de serviço e não pelos estados últimos. Neste caso, os perfis trabalham sob tensões relativamente baixas, o que pressupõe maior necessidade de rigidez do que de resistência. Com base nessa premissa, surgem soluções como as vigas metálicas alveolares e treliçadas, que propiciam aumento de inércia sem aumento significativo no peso da construção.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009, p.05) “com o desenvolvimento da ciência das construções e da metalurgia, as estruturas metálicas adquiriram formas funcionais e arrojadas, constituindo-se em verdadeiros trunfos da tecnologia”. Assim, com o avanço tecnológico das fábricas, bem como com a automação do processo de fabricação dos perfis, reduzindo consideravelmente seu custo, as vigas metálicas com aberturas sequenciais na alma vêm ganhando espaço no mercado da construção civil metálica, principalmente por oferecerem vantagens relevantes tanto em questões estéticas quanto na funcionalidade dos edifícios.

No último século, trabalhos de pesquisa experimental e teórica foram realizados para explicar o comportamento deste novo elemento estrutural e identificar os possíveis modos de colapso, proporcionando maior conhecimento e divulgação deste método construtivo empregado desde 1930.

Porém, apesar de mostrar significativas vantagens em comparação com as vigas de alma cheia, o uso de vigas celulares nem sempre se mostra necessário, uma vez que outros fatores devem ser considerados e analisados.

Neste contexto, através de um levantamento de dados bibliográficos, o objetivo deste trabalho é tornar mais simples o aprendizado e a divulgação deste método construtivo, tendo como enfoque analisar o uso de vigas celulares, bem como estudar as melhores técnicas de aplicação, suas principais vantagens, desvantagens e limitações.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Referencial Teórico

#### 2.1.1. A composição do aço

O aço é o material obtido através da liga do ferro com o carbono. Segundo Silva e Pannoni (2012, p.03) existem “[...] mais de 3500 especificações de aço, cada qual atendendo eficientemente uma ou mais aplicações.”, possuindo variações quanto ao teor de carbono e outros componentes em função da posterior aplicação do material. Sobre a evolução e ampliação do uso do ferro e, posteriormente, do aço como material de construção civil, podemos destacar que:

Já no final do século XVIII, por ocasião do que se convencionou chamar de Primeira Revolução Industrial, o ferro, entre outros

produtos industriais, surgiu como um material em condições de competir com os materiais de construção conhecidos e sacralizados até então, no que se refere a preço e outras qualidades. CRONOLOGIA do uso dos metais – Página 4. O ferro e o aço na construção civil. Portal Metálica. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/cronologia-do-uso-dos-metais-o-ferro-e-o-aco-na-construcao>> Acesso em: 08 ago. 2015.

Segundo Chiaverini (1996), dependendo “do ponto de vista de suas aplicações, os aços podem ser classificados em diversas categorias, cada qual com suas características.”. (CHIAVERINI, 1996 *apud* PFEIL; PFEIL, 2009, p.05).

Desta forma, no âmbito da construção civil, sua principal classificação é dada em função de sua composição química, sendo os aços-carbono e aços de baixa liga. A principal característica que distingue tais materiais relaciona-se ao teor de carbono adicionado à liga metálica.

Nos aços-carbono as porcentagens máximas de adições são de 2,0% para o carbono e 1,65% para o manganês, sendo possível a adição de silício (0,60%) e cobre (0,35%). Vale ressaltar que para características mais específicas, o teor de tais componentes pode variar de acordo com a necessidade requerida.

Os aços de baixa liga possuem teor de carbono relativamente baixo se comparado aos aços-carbono, sendo na maioria das vezes de 0,20%. No entanto, tal característica não interfere na capacidade resistente final da liga, uma vez que esta recebe adições de outros elementos, como cobre, manganês, níquel, fósforo, vanádio e zircônio, proporcionando que a liga, mesmo com baixos teores relativos de carbono, possua elevada resistência.

Para os aços, a relação existente entre o aumento do teor de carbono e o ganho de resistência é proporcional, dado que quanto maior a adição de carbono maior será a resistência final obtida. Porém, tal aumento é inversamente proporcional ao ganho de ductilidade, uma vez que torna o material frágil e com maiores riscos de colapso quando expostos à ação da solda.

Pfeil e Pfeil (2009) destacam que “[...] dos aços para estruturas são requeridas propriedades de boa **ductilidade, homogeneidade e soldabilidade** além de elevada relação entre a tensão resistente e a de escoamento [...].” (PFEIL; PFEIL, 2009, p.05, grifo nosso).

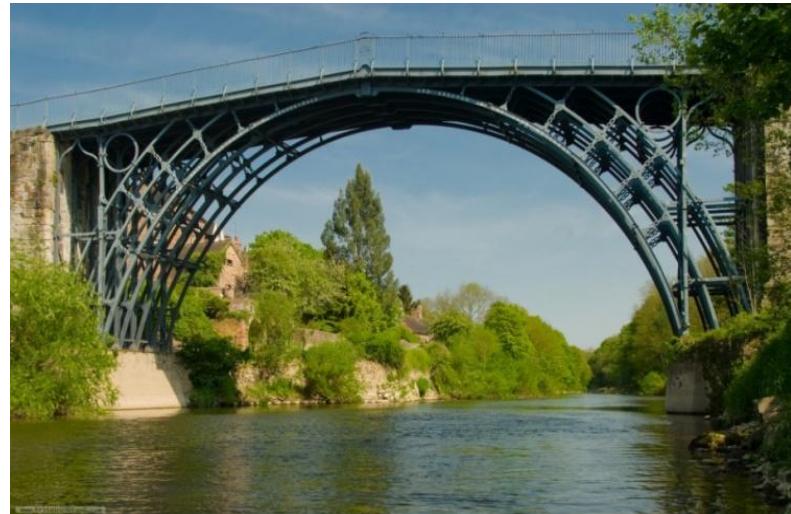
Logo, para garantir que não ocorra colapso nas ligações compostas por soldas, e por conseguinte, da estrutura de forma generalizada, é recomendada a utilização de aços de baixa liga, uma vez que diminuirá os riscos provenientes da falha destas ligações.

### **2.1.2. O uso do ferro e do aço como material de construção civil**

O uso de produtos siderúrgicos na construção civil teve início no século XVIII. Conforme Nakamura (2006), a partir deste século os arquitetos começaram a conceber edificações mais arrojadas e precisas, utilizando estruturas metálicas de origem industrial.

Desta forma, o uso do ferro em obras civis ganhou destaque significativo com a conclusão da Ponte de Coalbrookdale (Figura 1), no ano de 1779. Localizada sobre o Rio Severn, na Inglaterra, possui vão único de 30 metros e sua estrutura é composta por arcos de ferro fundido.

FIGURA 1 – Ponte de *Coalbrookdale*



Fonte: WALL CONVERT, 2015

Com o então sucesso desta obra, o uso do ferro fundido se expandiu por vários países, o que, consequentemente, possibilitou o avanço tecnológico deste novo material de construção.

Segundo Wodehouse, Fazio e Moffett (2011, p.437) “[...] a partir de 1875 o aço começou a substituir o ferro fundido e o ferro batido na construção, já que sua resistência à compressão e à tração superava a do ferro [...]”.

Assim sendo, a partir da inauguração de grandes obras como a Ponte do *Brooklin*, no ano de 1883, em Nova Iorque (Figura 2), até então considerada a maior ponte suspensa em aço do mundo, com vão central de quase 500 metros, o aço ganhou destaque e comprovou que se portava de forma adequada diante de solicitações extremas, constatando sua eficiência e resistência.

FIGURA 2 - Ponte do Brooklin



Fonte: VISITE NOVA YORK, 2015

Desde então, os avanços tecnológicos e os estudos sobre o comportamento deste material possibilitaram que este se tornasse um dos principais materiais de construção da atualidade, principalmente para obras de cronograma reduzido.

Sobre as vantagens do uso do aço, Bellei (2010) destaca:

- a) Alta resistência do material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão etc.), o que permite aos elementos estruturais suportarem grandes esforços apesar da área relativamente pequena das suas seções; [...], são mais leves do que os elementos constituídos em concreto armado;
- b) Os elementos de aço oferecem uma grande margem de segurança no trabalho, o que se deve ao fato de o material ser único e homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos;
- c) Os elementos de aço são fabricados em oficinas, de preferência seriado, e sua montagem é bem mecanizada, permitindo com isso diminuir o prazo final da construção;
- d) Os elementos de aço podem ser desmontados e substituídos com facilidade, o que permite reforçar ou substituir facilmente diversos elementos da estrutura;
- e) A possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção. (BELLEI *apud* ALMINHANA, 2014, p.27).

### 2.1.3. Estados limites

As estruturas dimensionadas sob os regulamentos e padrões da Norma Regulamentadora Brasileira – NBR 8800, trabalham sob duas condições de segurança. Tais condições correspondem aos Estados Limites Últimos (ELU) e aos Estados Limites de Serviço (ELS).

De acordo com a NBR 8800, os ELU's e ELS's são definidos como:

Os estados-limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional. Os estados-limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização. (ABNT NBR-8800:2008, p.14).

O uso do método dos estados limites assegura que a estrutura não seja solicitada além de sua capacidade, de forma que o carregamento ao qual está sendo solicitada não excede nunca aos estados limites, mesmo que esta esteja sujeita à pior combinação de carregamento (ABNT NBR-8800:2008).

No entanto, se um dos limites for excedido por tais combinações, “[...] a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada.” (ABNT NBR-8800:2008, p.14).

Conforme Pfeil e Pfeil (2009) a ação de cargas que excedam à capacidade que a estrutura suporta, ultrapassando o estado limite último, posteriormente acarretará no colapso da mesma, tendo como principais causas:

- a) Perda de equilíbrio como corpo rígido;
- b) Plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção;
- c) Ruptura de uma ligação ou seção;
- d) Flambagem em regime elástico ou não;
- e) Ruptura por fadiga. (PFEIL; PFEIL, 2009, p.35)

## 2.1.4. Elementos estruturais com abertura na alma

### 2.1.4.1 Conceito

Segundo Oliveira (2012), as vigas de aço com a alma expandida foram primeiramente usadas por engenheiros na década de 1930, a fim de aumentar a resistência dos perfis existentes.

Pfeil e Pfeil (2009, p.23) destacam que “as peças metálicas estruturais são fabricadas com dimensões transversais limitadas pela capacidade dos laminadores [...]”, sendo que esta restrição foi encontrada principalmente por projetistas do século passado, uma vez que as fábricas e os processos de produção eram praticamente manuais, tornando o custo muito elevado, além de as dimensões disponíveis serem limitadas, impossibilitando a elaboração de elementos capazes de resistir a cargas maiores e de atender a vãos mais amplos.

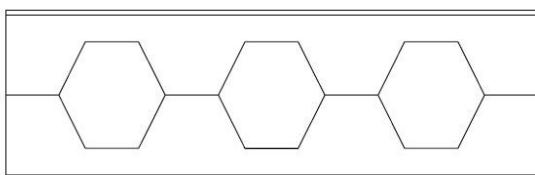
Assim, devido às limitações inerentes da época, as vigas com alma expandida foram desenvolvidas, permitindo que os perfis existentes adquirissem características de rigidez e resistência mais elevadas, proporcionando aos projetistas maior liberdade.

A princípio, por não existir equipamentos mecânicos que realizavam o corte e a posterior montagem dos elementos, as vigas com alma expandida possuíam alto custo financeiro, uma vez que o processo de produção era manual, impossibilitando a difusão deste método construtivo.

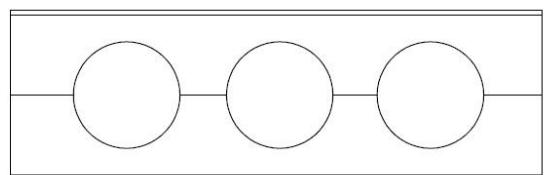
A partir da Revolução Industrial e do consequente desenvolvimento das indústrias de montagem e da automação do processo de produção, o uso de vigas com alma expandida se destacou, dado que seu processo de fabricação, antes muito oneroso, evoluiu e permitiu que o valor de produção passasse por um significativo processo de redução, tornando o produto mais interessante do ponto de vista comercial e permitindo que tal método construtivo obtivesse destaque.

As vigas alveolares são vigas com altura expandida através de aberturas ao longo de sua alma. Algumas destas vigas ganharam maior destaque, seja pela sua forma estética, pela sua funcionalidade ou pelo seu valor econômico. As vigas celulares são aquelas que possuem aberturas circulares ao longo de seu eixo de maior inércia, enquanto as vigas castelares possuem aberturas hexagonais (Figura 3).

FIGURA 3 – Design dos perfis castelados e celulares



Perfil castelado



Perfil celular

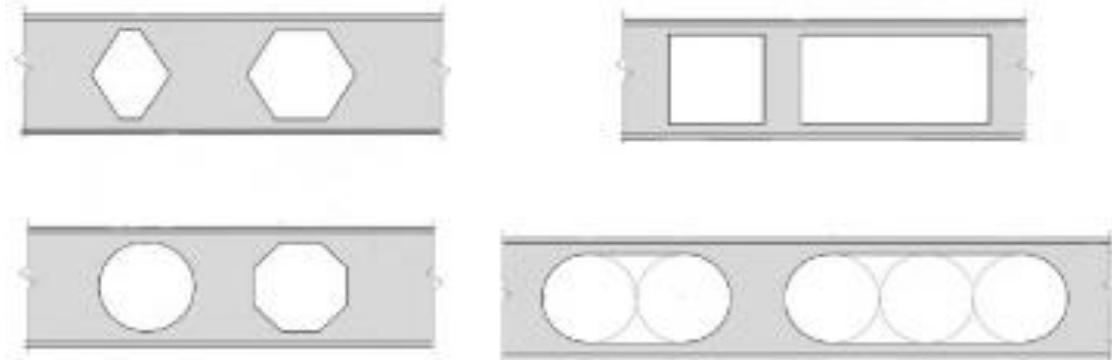
Fonte: Elaborado pela autora

### 2.1.4.2. Geometria

As vigas de aço com alma expandida podem possuir suas aberturas traçadas com diversas formas geométricas, variando de formas mais simples como as retangulares, quadradas, hexagonais, circulares ou semicirculares alongadas

(Figura 4), à outras com formas irregulares menos comuns, tais como a apresentada na Figura 5, oferecendo ao profissional maior autonomia na escolha da composição geométrica do elemento que melhor se adeque ao design da estrutura da qual fará parte.

FIGURA 4 – Formas geométricas das aberturas



Fonte: Adaptado de RODRIGUES, 2007, p.31

FIGURA 5 – Vigas Angelina



Fonte: ARCELORMITTAL, p.42

Segundo Rodrigues (2007) “uma combinação das formas citadas [...] é possível, muito embora tal conformação acarrete a necessidade de um estudo mais detalhado dos mecanismos de resistência o perfil, além de apresentar um processo de fabricação mais oneroso [...].” (RODRIGUES, 2007, p.31).

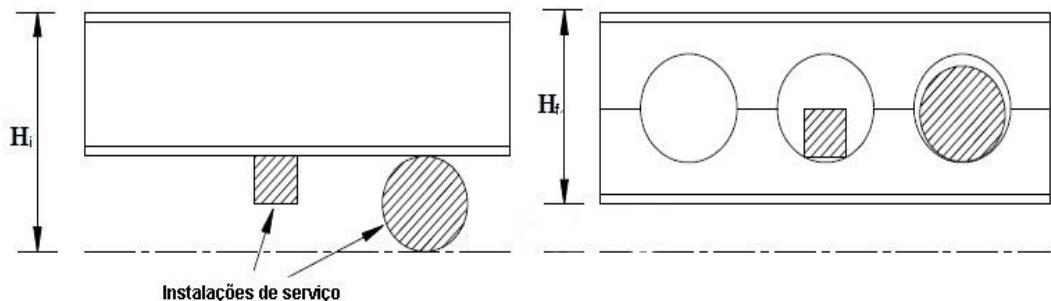
Dentre as configurações geométricas apresentadas, podemos destacar dois que apresentam uso mais difundido em obras que utilizam este método construtivo, sendo eles: perfis compostos por aberturas hexagonais (perfis castelados), ou por perfis com aberturas circulares (perfis celulares).

As vigas casteladas e celulares têm sido utilizadas em vários tipos de construções há muitos anos, sendo que suas aplicações mais comuns se dão em edifícios de múltiplos andares, estacionamentos cobertos e coberturas em geral,

onde grandes vãos são indispensáveis, como galpões industriais, comerciais, teatros, campos e estádios de futebol.

Em edifícios compostos por muitos andares, os projetistas procuram reduzir ao máximo a altura dedicada aos elementos estruturais, e principalmente aquelas dedicadas às instalações técnicas necessárias para passagem de dutos de ventilação, água, cabos, e outros serviços necessários (Figura 6). Isto afeta consideravelmente a altura dos pavimentos, sendo interessante o uso de estruturas que permitam, de forma segura, a passagem destas instalações (Figura 7).

FIGURA 6 – Redução na altura necessária para passagem de instalações



Fonte: Adaptado de ERDAL, 2011, p.5

FIGURA 7 – Passagem de tubulações por aberturas em vigas celulares



Fonte: VERWEIJ, 2010, p.21

Sendo assim, os projetistas procuram trabalhar com basicamente duas opções: reduzir a altura dos elementos estruturais, como vigas e lajes, permitindo que as instalações passem abaixo destes elementos, ou integrar os elementos estruturais aos demais da construção.

Segundo Publicação da ArcelorMittal, a altura reduzida em cada andar através do uso de vigas celulares, ao possibilitar a passagem de dutos em sua alma, acarreta um ganho de cerca de 25 a 40 cm por andar, se comparado aos métodos tradicionais. Para edifícios de grande porte, com altura limitada entre 35 e 40 metros,

o ganho de apenas 20 cm por andar permite a instalação de um andar adicional. (ARCELORMITTAL, p.02).

Todavia, em edifícios com um número fixo de andares, os resultados de economia são evidentes através da redução do consumo de materiais gastos com revestimentos internos e externos, e também a redução do número de pilares e elementos de fundação, uma vez que os vãos possíveis são consideravelmente maiores do que os obtidos com estruturas convencionais de concreto armado, além de o peso final da construção ser substancialmente menor, o que acarreta em elementos de fundação reduzidos.

### 2.1.5. Vigas celulares

#### 2.1.5.1. Conceito

O surgimento de vigas celulares se deu, em primeiro lugar, para a aplicação arquitetônica, visto que estruturas expostas de aço com aberturas circulares na alma eram consideradas esteticamente mais agradáveis do que vigas casteladas.

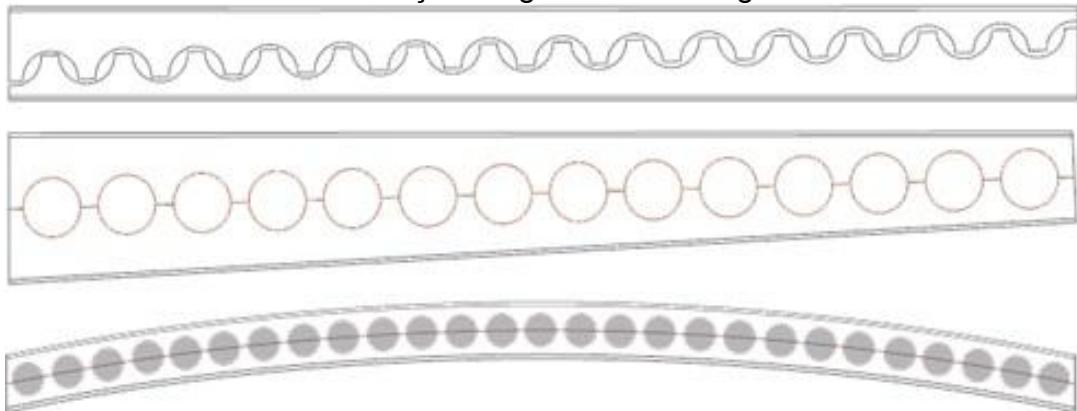
O uso destes perfis resulta em estruturas mais leves, com vãos maiores e ambientes mais iluminados, além de propiciar significativa redução da altura total do edifício, dado que as aberturas da alma permitem a interatividade entre a estrutura e as instalações técnicas do edifício.

Sobre as vantagens dos perfis celulares em relação aos perfis de alma cheia, Abreu destaca que “viga celulares pesam 35% a 50% menos do que vigas em perfis laminados equivalentes, sob as mesmas condições de vão e carregamento.” (ABREU, 2011, p.02)

Conforme Altfillisch, Cooke e Toprac *apud* Erdal (1957, 2011), os momentos suportados por perfis alveolares são da ordem de 10% a 35% superiores aos obtidos com o perfil anterior ao processo de corte e solda.

Segundo Abreu (2011), se comparadas às vigas casteladas, as vigas celulares apresentam significativas vantagens. Dentre elas destaca-se a flexibilidade de geometria, uma vez que o processo de fabricação em corte duplo permite diversas combinações de forma (Figura 8), tanto para a distância entre os eixos, quanto para os raios das aberturas. Tal fato confere aos projetistas maior liberdade, assim como dimensionamentos econômicos mais precisos.

FIGURA 8 – Variação da geometria de vigas celulares



Fonte: ARCELORMITTAL, p.8

As principais aplicações das vigas celulares são:

a) Coberturas: vigas celulares permitem vencer grandes vãos, na ordem de 50 metros, conforme a Figura 9 e 10.

FIGURA 9 – Shopping Center, Tamworth



Fonte: ERDAL, 2011, p.7

FIGURA 10 – Aplicação de viga celular curva, Winchester



Fonte: ERDAL, 2011, p.7

b) Vigas de sustentação para pisos de edifícios de grande porte: as vigas celulares permitem a acomodação das instalações técnicas dos edifícios (Figura 11), proporcionando a redução do pé direito dos pavimentos. Para estruturas de grande porte, tais reduções na altura consistem em grandes vantagens.

FIGURA 11 – Vão de viga celular



Fonte: ABREU, 2011, p.7

### 2.1.5.2. Processo de produção

Os perfis de aço podem ser modificados para intensificar sua resistência através da expansão da alma da seção, por meio de aberturas efetuadas a partir de um perfil laminado original.

Conforme Oliveira (2012), o processo de fabricação de vigas com alma expandida consiste basicamente em três etapas:

- a) O corte longitudinal do perfil original de alma cheia;
- b) O deslocamento e a solda, com ou sem a inserção de chapas expansoras;
- c) Corte das laterais remanescentes do deslocamento e acabamento. (OLIVEIRA, 2012, p.11)

Os elementos celulares são obtidos pelo corte longitudinal duplo de perfis laminados, com padrão intercalado de um corte semicircular e um segmento de reta, ao longo de todo o eixo central do perfil. Após o corte, as metades obtidas são separadas e soldadas entre os segmentos de reta, conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13.

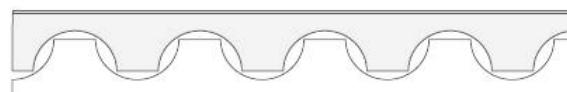
FIGURA 12 – Corte e soldagem de vigas celulares



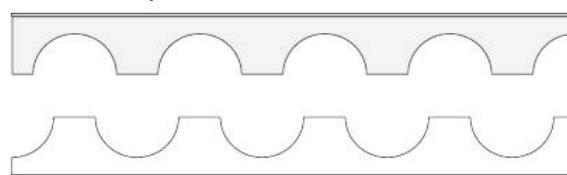
Fonte: Adaptado de ARCELORMITTAL, p.6 e ABREU, 2011, p.2

FIGURA 13 – Processo de corte e montagem de vigas celulares

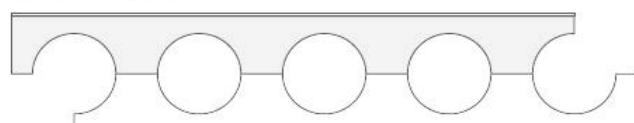
Etapa 1 : Corte do perfil original



Etapa 2 : Separação dos perfis obtidos



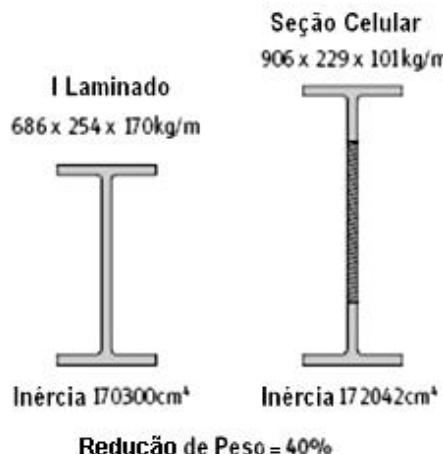
Etapa 3 : Soldagem



Fonte: Adaptado de ARCELORMITTAL, p.6

Segundo Erdal (2011), os processos de corte e solda proporcionam aumento na altura global da viga de cerca de 40 a 60%, gerando acréscimos consideráveis na capacidade de resistência ao cisalhamento, à flexão e à rigidez do elemento, conforme ilustrado na Figura 14. Deste modo, o ganho de rigidez sem o aumento do peso por metro linear tem sido a principal motivação do emprego destes perfis por projetistas.

FIGURA 14 – Acréscimo no momento de inércia de perfis celulares



Fonte: Adaptado de ABREU, 2011, p.2

### 2.1.5.3. Modos de colapso

Nas vigas celulares, além dos modos de falha semelhantes aos ocorridos em vigas de alma cheia, verifica-se também a possibilidade da ocorrência de outros modos de colapso, originados a partir do aumento da esbeltez ao qual o perfil é exposto após a expansão de sua altura.

Segundo Silveira (2011, p.32), “a distribuição das tensões e os deslocamentos também apresentam sensíveis diferenças devido à periódica mudança na área da seção transversal e a alma fica mais suscetível a fenômenos de instabilidade com a borda livre dos alvéolos.”

De acordo com Silveira (2011), existem basicamente seis modos diferentes de colapso de vigas com alma expandida.

- Colapso por formação de mecanismo plástico;
- Colapso do montante da alma por cisalhamento;
- Colapso do montante da alma por flexão;
- Colapso por flambagem do montante da alma;
- Colapso por rasgamento da solda de emenda à meia altura do montante da alma;
- Colapso da viga por flambagem lateral com torção. (SILVEIRA, 2011, p.32).

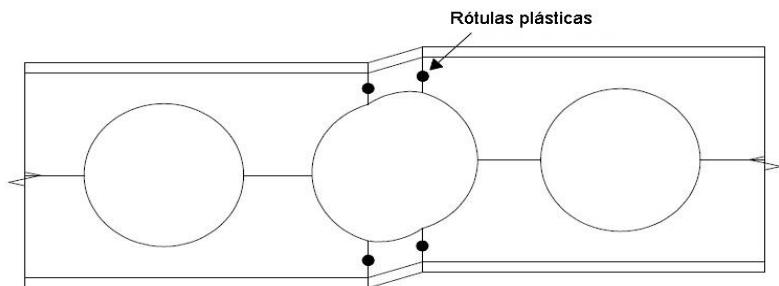
Estes modos de colapso são originados através da interferência de fatores como a geometria das aberturas, o índice de esbeltez do perfil, o tipo de carga e o tipo de contenção dos apoios laterais.

#### 2.1.5.3.1. Formação de mecanismo plástico

Em vigas de alma cheia há elevados esforços cortantes atuantes na alma destes elementos. Todavia, em vigas celulares, a presença de aberturas na alma

altera o percurso destes esforços, conduzindo-os para os T's superior e inferior, formados a partir do processo de corte. Deste modo, as tensões cisalhantes de alta magnitude se acumulam em pequenos pontos próximos aos cantos das aberturas, gerando momentos de segunda ordem, e assim, ocasionando deformações diferenciais no montante da alma, e consequentemente, no surgimento de rótulas plásticas (Figura 15). Este modo de colapso é conhecido também como mecanismo de *Vierendeel*.

FIGURA 15 – Rótulas plásticas



Fonte: Adaptado de ERDAL, 2011, p.28

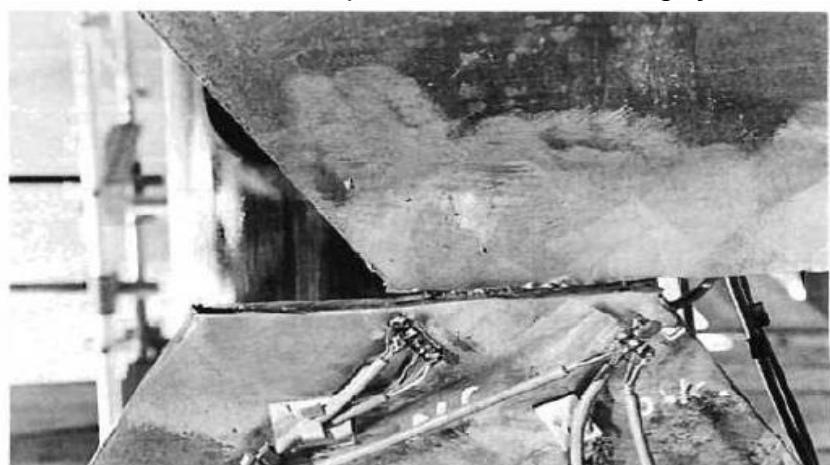
#### 2.1.5.3.2. Ruptura da solda de emenda

Segundo Silveira (2011, p.34) “a ruptura da solda da região ocorre quando se reduz o comprimento da abertura com o objetivo de diminuir o efeito do momento secundário e assim evitar a formação do mecanismo de *Vierendeel*.”

Ainda segundo Silveira (2011), através de ensaios realizados a fim de analisar o comportamento das ligações por soldas, concluiu-se que este modo de colapso ocorre quando a viga atinge sua capacidade máxima suportada, de forma que a ruptura da solda ocorre quando as tensões cisalhantes são excessivas. Em alguns casos, a ruptura não acontece, havendo apenas uma significativa deformação no entorno da região soldada.

A Figura 16 mostra o rompimento horizontal da solda, causado devido ao pequeno tamanho desta em relação à dimensão do alvéolo.

FIGURA 16 – Rompimento da solda de ligação



Fonte: ERDAL, 2011, p.31

### 2.1.5.3.3. Colapso da viga por flambagem lateral

Conforme Abreu (2011), este modo de colapso é caracterizado quando o elemento atinge seu estado limite último, causado pelo excessivo momento fletor atuante em seu eixo de maior momento de inércia. Este esforço é caracterizado tanto por movimentos de translação lateral, quanto por esforços de torção. Ainda segundo Abreu, “esses dois movimentos, que ocorrem simultaneamente, podem ser explicados pelo fato de a parte comprimida da seção transversal ser ligada continuamente por meio da alma à parte tracionada.” (ABREU, 2011, p.19)

No meio científico, várias são as opiniões acerca da influência das aberturas na alma sobre a capacidade de resistência à flambagem lateral da viga.

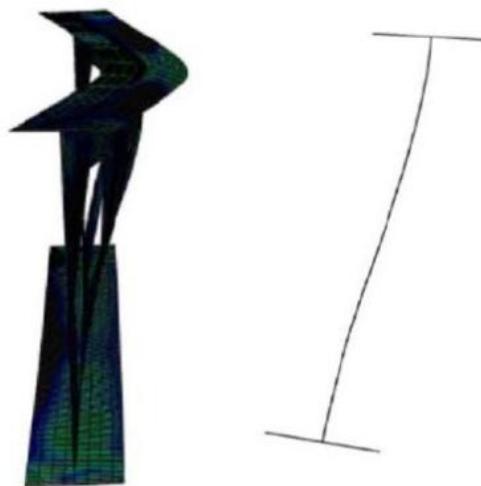
Segundo Silveira (2011), alguns autores concluíram que as aberturas pouco influenciam na capacidade de resistência à torção, embora estudos recentes comprovem que a variação da área da seção transversal interfere nos índices de resistência ao giro, principalmente nos eixos de menor inércia.

Verweij (2010) também destaca que embora tenha sido demonstrado que a presença de aberturas na alma de vigas influencia na capacidade de resistência à torção lateral, testes revelaram que não há diferença no comportamento de vigas com alma cheia e vigas com alma vazada sob os efeitos de flambagem lateral. Segundo ele, ambas as vigas se deformam da mesma maneira, independente da configuração de sua alma.

No entanto, sabe-se que independentemente da presença ou não de aberturas na alma de vigas, uma das maiores influências que a viga pode receber, acarretando em danos à estabilidade lateral do elemento (Figura 17), envolve sua condição de contenção lateral. Assim, se não houver uma contenção adequada dos apoios, este modo de colapso será dominante em relação aos outros.

Uma forma de combater a flambagem lateral de vigas celulares, é permitindo que a mesa superior da viga trabalhe com a laje. Este método é conhecido como vigas mistas, no qual a ação de conectores restringe a rotação da mesa superior, impedindo o deslocamento lateral do “T” e da alma da viga.

FIGURA 17 – Flambagem lateral



Fonte: SILVEIRA, 2011, p.67

#### 2.1.5.3.4. Colapso do montante da alma

O colapso do montante de almas de vigas celulares devido a flambagem pode ocorrer tanto por cisalhamento quanto por compressão, variando de acordo com a geometria das aberturas e com os esforços aos quais a estrutura está exposta. (SILVEIRA, 2011, p.35).

Na flambagem por compressão, Ferrari (2013) destaca que “o montante sofre um deslocamento para fora do plano da viga sem que ocorra torção [...], comportando-se como uma coluna submetida à compressão.” (FERRARI apud ALMINHANA, 2014, p.65), conforme a Figura 18. Este modo de colapso ocorre normalmente em locais onde há uma alta concentração de cargas, sendo comuns próximos a apoios e a cargas aplicadas.

FIGURA 18 – Flambagem do montante da alma

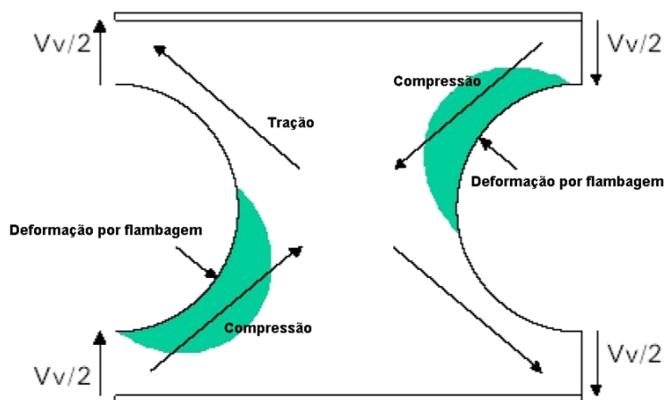


Fonte: VERWEIJ, 2010, p.35

No que tange à flambagem por cisalhamento, Silveira (2011) explica que esta ocorre quando o esforço cortante é significativo diante do momento atuante, sendo que tal colapso pode ser influenciado tanto pela geometria dos furos quanto pela adição de chapas expansoras na alma.

Na Figura 19, são destacadas as áreas mais afetadas pela flambagem em vigas com aberturas na alma.

FIGURA 19 – Áreas atingidas pela flambagem



Fonte: Adaptado de VERWEIJ, 2010, p.35

### 2.1.6. Análise de viabilidade

Abaixo estão relacionadas as principais limitações encontradas pelos projetistas que utilizam vigas celulares, sendo de fundamental relevância analisar se a viga em estudo estará suscetível a um dos modos de colapso destacados anteriormente e se o emprego deste método construtivo realmente será justificável, mesmo diante destas desvantagens:

- a) Menor capacidade de suportar cargas concentradas de maior amplitude;
- b) Aumento nos custos de produção;
- c) Exige dimensionamento mais rigoroso;
- d) Redução na capacidade de resistir a esforços axiais;
- e) Redução de resistência a cargas concentradas;
- f) Comportamento inadequado quando expostas a altas temperaturas.

Entre as principais vantagens do uso de vigas celulares, relacionam-se abaixo as que mais se destacam, sendo estas as que mais influem na escolha destes elementos na concepção de estruturas:

- a) Redução do peso por metro linear das vigas em cerca de 40% quando comparadas a vigas de alma cheia de mesma seção;
- b) Capacidade de suportar momentos e cargas de 10 a 35% mais elevados do que os perfis originais;
- c) Permite vencer vãos de até 50 metros livres;
- d) Reduz o pé direito dos pavimentos, dado que nas aberturas das vigas é possível a interação entre a estrutura e as instalações técnicas;
- e) Reduz o número de pilares e elementos de fundação, uma vez que são capazes de vencer vãos elevados;
- f) Reduz o tamanho dos elementos de fundação, uma vez que o peso global do edifício é consideravelmente menor;
- g) Reduz os custos decorrentes com as fundações e pilares, uma vez que o número destes elementos será reduzido devido aos vãos maiores e à redução do peso global da estrutura;
- h) Rapidez de montagem das estruturas;
- i) Estruturas com precisão milimétrica;
- j) Ótima qualidade da composição do material, em razão do processo industrializado de fabricação;
- k) Estética diferenciada;
- l) Maior autonomia dos projetistas durante o processo de concepção geométrica do elemento se comparado às vigas casteladas, visto que as vigas celulares possuem elevada flexibilidade de formas e de espaçamento entre as aberturas.

Diante do exposto anteriormente, podemos destacar que o uso de vigas celulares se mostra satisfatório, principalmente em estruturas de cobertura e outras que contenham cargas uniformemente distribuídas, uma vez que seus modos de colapso são mais evidentes e prováveis quando as vigas estão submetidas às cargas concentradas.

Assim sendo, é necessário analisar se é justificável o uso destas vigas, assim como a viabilidade dos custos em função dos benefícios que o emprego destes elementos trará. Desta forma, uma análise complexa e criteriosa é requerida,

analizando suas limitações e principalmente as vantagens proporcionadas pelo emprego destes elementos nas estruturas.

## 2.2. Metodologia

A pesquisa científica é caracterizada pela necessidade de respostas e soluções para um ou mais problemas específicos, nos quais vários métodos e meios de informação serão utilizados para que tais respostas sejam formuladas.

Segundo Minayo (1993) a pesquisa científica é caracterizada como:

atividade básica das ciências na sua indagação e descoberta da realidade. É uma atitude e uma prática teórica de constante busca que define um processo intrinsecamente inacabado e permanente. É uma atividade de aproximação sucessiva da realidade que nunca se esgota, fazendo uma combinação particular entre teoria e dados. (MINAYO, 1993, apud SILVA; MENEZES; 2005, p.19)

De acordo com Fonseca (2002) *apud* Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa bibliográfica distingue-se da pesquisa documental, de forma que enquanto esta possui uma área de pesquisa mais abrangente, aquela é mais restrita a livros e a artigos científicos.

Desta forma, este trabalho utiliza o método da pesquisa documental associada à pesquisa científica, buscando através de sites, revistas, catálogos de empresas, livros e artigos científicos, o levantamento de referências teóricas já estudadas e publicadas no meio científico e acadêmico, tendo como principal objetivo compreender o comportamento das vigas celulares, bem como proporcionar ao engenheiro maior conhecimento e alternativas para solucionar problemas de ordem estrutural e arquitetônica das edificações.

## 3. CONCLUSÃO

Muitas são as vantagens da utilização de vigas celulares, e para cada caso em que estas serão empregadas, é possível a obtenção de diferentes vantagens peculiares ao seu uso. Tanto na concepção de prédios de múltiplos andares, quanto para construções que requerem grandes vãos livres, o uso de vigas celulares se mostra satisfatório, principalmente quando é necessário vencer grandes vãos livres ou reduzir a altura do pé direito dos pavimentos dos edifícios.

Quanto à resistência, Rodrigues (2007) destaca que as vigas celulares apresentam resistência cinco vezes maior quando comparadas as vigas com furo retangular, e duas vezes e meia para vigas com furo quadrado. Ainda segundo o autor, dependendo da localização do furo circular no eixo da alma da viga, a existência deste furo se torna irrelevante no que diz respeito à redução da capacidade de resistência final do elemento.

Assim, durante a elaboração do projeto, é fundamental a análise dos principais modos de colapso nos quais a estrutura em análise estará suscetível. Além disso, vale ressaltar que nem todos os modos de colapso apresentam tamanha importância, sendo necessária uma investigação prévia dos mais relevantes para o elemento em estudo.

Apesar de o mecanismo de *Vierendeel* ser amplamente estudado por diversos autores, para vigas com sucessivas aberturas na alma, é essencial a verificação criteriosa de outros modos de colapso, como aqueles que englobam a flambagem da alma e a flambagem lateral do elemento. Rodrigues (2007) destaca que para as vigas nas quais as aberturas na alma correspondem a 75% da altura do perfil, o

mecanismo de *Vierendeel* prevalecerá como modo de ruína, independente do vão da viga e da geometria da abertura.

Para uma análise mais específica dos principais modos de colapso, assim como das melhores formas de reduzi-los, é necessário um estudo mais detalhado e específico que vá além de estudos bibliográficos, baseado principalmente em estudos e ensaios laboratoriais que identifiquem e analisem a estrutura interna dos elementos, bem como seu comportamento frente às solicitações decorrentes da atuação de cargas concentradas e distribuídas, e também à ação do cisalhamento.

Vale ressaltar também, que para futuros trabalhos, é importante analisar de forma criteriosa o comportamento destes elementos estruturais quando expostos à altas temperaturas, e assim, estudar métodos que previnam e protejam a estrutura.

No processo de concepção estrutural é essencial que sejam avaliados os critérios de dimensionamento e de viabilidade financeira e estrutural, visto que para projetos de menores dimensões, principalmente no Brasil, é provável que o uso destas estruturas não seja realmente justificável e viável.

Porém, para estruturas de grande porte como coberturas de quadras, campos de futebol, shoppings, galpões e edifícios com grandes vãos, onde a redução do número de pilares não está relacionada apenas à conceitos arquitetônicos, mas principalmente à funcionalidade da edificação e à economia de materiais e mão de obra, seu uso se torna relevante, possibilitando melhor aproveitamento dos espaços, maior liberdade ao projetista, redução do custo e cronograma da obra, além de propiciar maior leveza estrutural e visual.

Desta forma, o emprego de vigas celulares se mostra vantajoso principalmente quando as cargas atuantes são distribuídas, sendo necessários estudos criteriosos quando cargas aplicadas atuarem nestes elementos estruturais, analisando principalmente os efeitos que estas solicitações causarão na viga.

#### 4. REFERÊNCIAS

ABREU, Laura Maria Paes de. **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <[http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/acero/NBR8800\\_2008\\_1.pdf](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/acero/NBR8800_2008_1.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2014.

ALMINHANA, Guilherme Wienandts. **Vigas metálicas alveolares**: análise comparativa com vigas de alma cheia. 2014. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ARCELOR MITTAL. **ACB Cellular Beams**. Luxemburgo: Arcelor Mittal, s.d.

CRONOLOGIA DO USO DOS METAIS – Página 4. **O ferro e o aço na construção civil**. s.l: Portal Metálica, s.d. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/cronologia-do-uso-dos-metais-o-ferro-e-o-aco-na-construcao>> Acesso em: 08 ago. 2015.

ERDAL, Ferhat. **Ultimate load capacity of optimally designed cellular beams.** 2011. Thesis (doctor). Middle East Technical University, 2011.

FAZIO, Michael; MOFFETT, Marian; WODEHOUSE, Lawrence. **A história da arquitetura mundial.** Porto Alegre: AMGH, 2011.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

NAKAMURA, J. **Era do aço.** s.l: Revista Pini AU. Edição 152, 2006. Disponível em: <<http://au.pini.com.br/arquitetura-urbanismo/152/artigo34881-1.aspx>>. Acesso em: 16 out. 2015.

OLIVEIRA, Luiza Baptista de. **Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura.** 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço:** dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

RODRIGUES, Flávio. **Comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma.** 2007. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

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

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Disponível em: <[https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia\\_de\\_pesquisa\\_e\\_elaboracao\\_de\\_teses\\_e\\_dissertacoes\\_4ed.pdf](https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2015.

SILVEIRA, Eliane Gomes da. **Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação.** Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011.

VERWEIJ, J.G. **Cellular beam-columns in portal frame structures.** 2010. Thesis (doctor). Delft University of Technology. 2010.