



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**  
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica  
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto: projeto; dimensionamento; fabricação; e montagem

### **VIGAS CELULARES DE AÇO: CONCEITO, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES** (trabalho completo)

Gustavo de Souza Veríssimo <sup>1</sup>

Felipe Isamu Harger Sakiyama <sup>2</sup>

Luis Augusto Lancellotti Zapparolli Pupin <sup>3</sup>

Raylane de Souza Castoldi <sup>4</sup>

#### **Resumo**

As vigas celulares são uma evolução das vigas casteladas, viabilizada pelas tecnologias de projeto e fabricação assistidos por computador, que se desenvolveram a partir dos anos 1980. Usualmente são fabricadas a partir do corte de um perfil I em duas metades, sendo o corte realizado de tal forma que resulta um perfil com uma sequência de aberturas circulares de mesmo diâmetro, regularmente espaçadas ao longo do vão. No Brasil ainda não existem prescrições normativas específicas nem material técnico de apoio para arquitetos e engenheiros utilizarem esse tipo de elemento estrutural em projetos de edificações. Este artigo apresenta uma visão geral sobre vigas celulares de aço, bem como recomendações e procedimentos que podem auxiliar profissionais de arquitetura e engenharia a conhecerem e utilizarem esses elementos estruturais em projetos, tirando o melhor proveito de seus atributos. O artigo aborda o conceito das vigas celulares, para que servem, compara seu comportamento e desempenho estrutural com vigas de alma cheia, descreve seus modos de falha, comenta sobre eventuais dificuldades com as configurações de corte e apresenta uma ferramenta computacional voltada especificamente para projeto e dimensionamento de vigas celulares, compatível com a normalização brasileira para o projeto de estruturas de aço.

**Palavras-chave:** Vigas celulares; Vigas Alveolares; Sistema de piso.

### **STEEL CELLULAR BEAMS: CONCEPT, CHARACTERISTICS, AND APPLICATIONS**

#### **Abstract**

Cellular beams are an evolution of castellated beams, made possible by computer-aided design and manufacturing technologies that have developed since the 1980s. They are usually produced by cutting an I-profile into two halves, with the cut performed in such a way that it results in a profile with a series of evenly spaced circular openings of the same diameter along the span. In Brazil, there are still no regulatory prescriptions or technical support materials for architects and engineers to use this type of structural element in building projects. This article provides an overview of steel cellular beams, along with recommendations and procedures that can help architecture and engineering professionals understand and apply these structural elements in their designs, making the most of their attributes. It covers the concept of cellular beams, their applications, a comparison of their structural behavior and

performance with solid-web beams, descriptions of their failure modes, potential challenges related to cutting configurations, and a computational tool specifically designed for the design and sizing of cellular beams, compatible with Brazilian standards.

**Keywords:** Cellular Beams; Alveolar Beams; Floor System.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor Titular, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia, Professor Adjunto, Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Especialista, Engenheiro de P&D, ArcelorMittal Brasil, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheira Civil, Doutora em Estruturas, Especialista de Desenvolvimento da Construção, Departamento Comercial, ArcelorMittal Brasil, Serra, ES, Brasil.

## 1 GENERALIDADES SOBRE VIGAS CELULARES

### 1.1 Origem e conceito das vigas celulares

As vigas celulares (Figura 1a) são uma evolução das vigas casteladas (Figura 1b), obtidas por meio de um corte mais complexo viabilizado pelas tecnologias de projeto e fabricação assistidos por computador, que se desenvolveram a partir dos anos 1980, resultando num perfil com aberturas circulares na alma (Fares, Coulson e Dinehart, 2016).

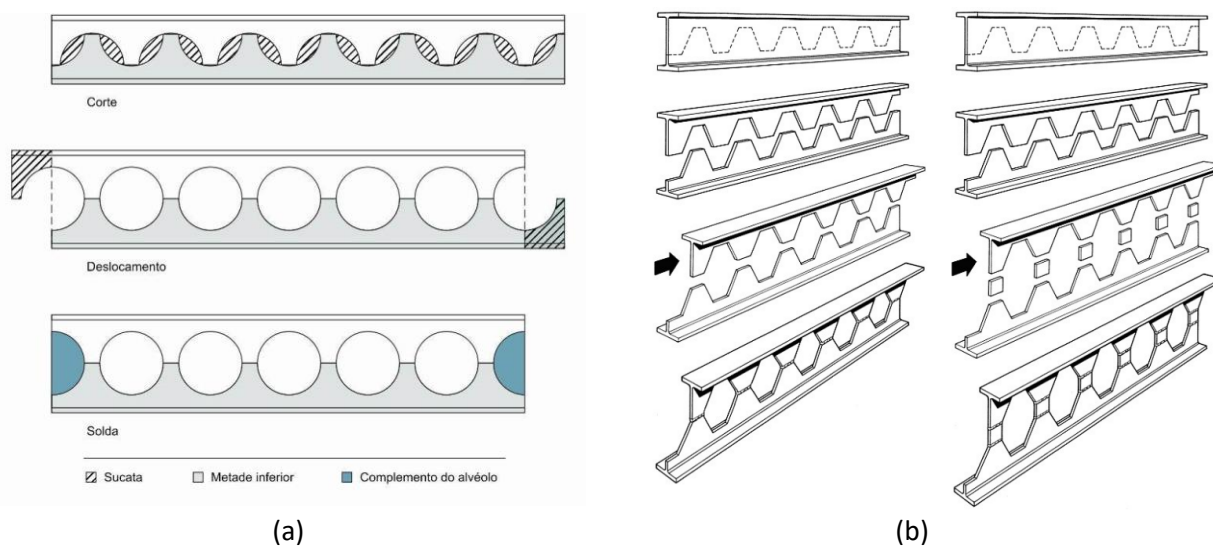


Figura 1 – Representação esquemática da fabricação a partir do corte de um perfil I laminado (a) viga celular; (b) viga castelada (adaptado de GRÜNBAUER, 2012).

As primeiras vigas casteladas surgiram por volta dos anos 1930, como uma solução alternativa para suprir a gama limitada de perfis I disponíveis na época. Normalmente, essas vigas são obtidas a partir de um perfil I de alma cheia cortado longitudinalmente, como mostrado na Figura 1. Após o corte, as duas metades obtidas são deslocadas de certo comprimento e soldadas, dando origem a um novo perfil com altura superior à do perfil original e uma sequência de aberturas na alma. Originalmente, essas vigas foram chamadas de vigas casteladas, pelo fato de a metade cortada lembrar a muralha de um castelo medieval com suas ameias (aberturas no alto da muralha onde os arqueiros se posicionavam para defender uma fortaleza). O processo de fabricação é usualmente referido como “castelação”.

O processo de corte da viga celular foi criado no Reino Unido, por Peter A. Walker, e patentado em 1990. A companhia britânica *Wescol Structures Limited* foi cessionária da invenção e detentora das patentes das vigas celulares até 2009, quando a tecnologia se tornou de domínio público (Oliveira, 2012).

## 1.2 Vantagens das vigas celulares

As vigas celulares apresentam diversas vantagens em relação ao perfil original de alma cheia, tais como:

- maior inércia com relação ao principal eixo de flexão e, portanto, maior rigidez e maior resistência ao momento fletor;
- capacidade de vencer vãos maiores do que os perfis que as originam;
- as aberturas na alma facilitam a passagem da luz natural, a circulação do ar e a evacuação de fumaça, além de possibilitarem a integração das instalações prediais com a estrutura;
- sua aparência leve, aliada à alta resistência, permite aos arquitetos explorar novas formas estruturais;
- são muito versáteis para reforço e requalificação de edifícios antigos;
- podem ser fabricadas com eixo curvo, para facilitar a drenagem em sistemas de coberturas ou satisfazer requisitos formais de arquitetura.

Esse conjunto de vantagens tem motivado arquitetos e engenheiros em todo o mundo a empregar perfis celulares das mais diversas formas.

## 1.3 Fabricação

Antes do advento das máquinas CNC, o corte na alma das vigas casteladas era feito manualmente, em segmentos retos, com o auxílio de gabaritos. Atualmente, a viga pode ser projetada com o auxílio de um software, e o corte pode ser realizado automaticamente, por máquinas CNC (Figura 2). Após o corte, as metades são reposicionadas, formando-se as aberturas circulares, e a alma é soldada, obtendo-se uma viga celular. Os perfis I originais tanto podem ser laminados como soldados.



Figura 2 – Corte na alma para produção das metades de uma viga celular.  
(foto: ArcelorMittal Europa)

### 1.3.1 Vigas celulares com eixo reto

As vigas celulares com eixo reto são as que apresentam o processo de fabricação mais simples. Elas são obtidas pela sequência de corte longitudinal, deslocamento e solda conforme ilustrado na Figura 1.

### 1.3.2 Vigas celulares com eixo curvo

Podem-se obter vigas celulares de eixo curvo de duas maneiras: fabricando uma viga reta e, posteriormente, aplicando uma contraflecha; ou cortando-se dois perfis originais com alvéolos (ou células) de tamanhos ligeiramente diferentes (Figura 3).

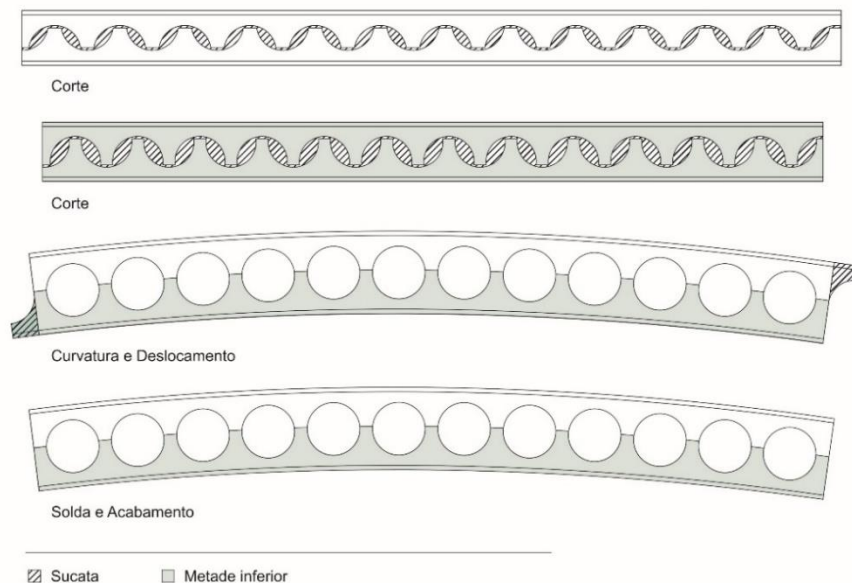


Figura 3 – Viga celular com eixo curvo.

No caso do corte de dois perfis com alvéolos diferentes, as metades do perfil com células maiores irão constituir os dois tês superiores de duas vigas curvas, e as metades do perfil com células menores irão constituir os dois tês inferiores dessas mesmas vigas. Para o corte em cada um dos perfis é necessário considerar o raio de curvatura da viga celular, bem como as implicações da curvatura no traçado dos cordões superior e inferior. Geometricamente, o comprimento do vão do arco, sua flecha e seu raio se relacionam, de modo que, conhecendo-se o raio ( $R$ ) e o vão ( $L$ ), pode-se determinar a flecha ( $\delta$ ) por meio da Eq.(1).

$$\delta = R - \frac{\sqrt{4R^2 - L^2}}{2} \quad (1)$$

A curvatura das vigas celulares pode ser necessária por dois motivos: exigência arquitetônica de elementos de cobertura e compensação da flecha devido às ações permanentes.

### 1.3.3 Vigas celulares com altura variável

Com um pequeno ajuste no alinhamento do traçado do corte é possível fabricar uma viga celular de altura variável. Estabelecendo-se um alinhamento que faça um pequeno ângulo com o eixo do perfil original, pode-se cortá-lo em diagonal e rebater uma das metades em relação à outra, obtendo-se uma viga de inércia variável, como ilustrado na Figura 4. Essa configuração é interessante para estruturas com grande momento fletor em uma das extremidades, como coberturas em balanço e coberturas de galpões.

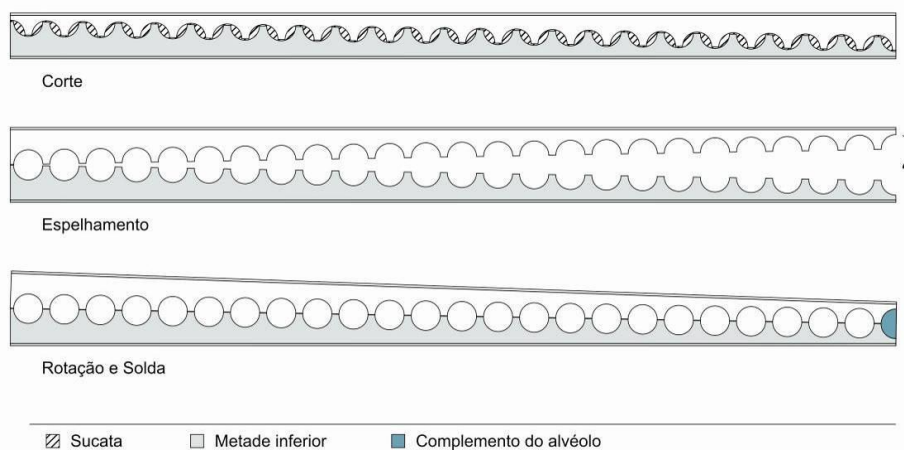
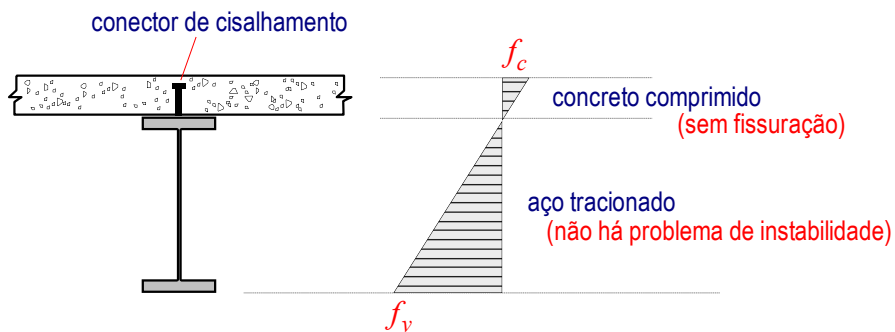


Figura 4 – Viga celular de inércia variável.

### 1.3.4 Vigas celulares com seções assimétricas

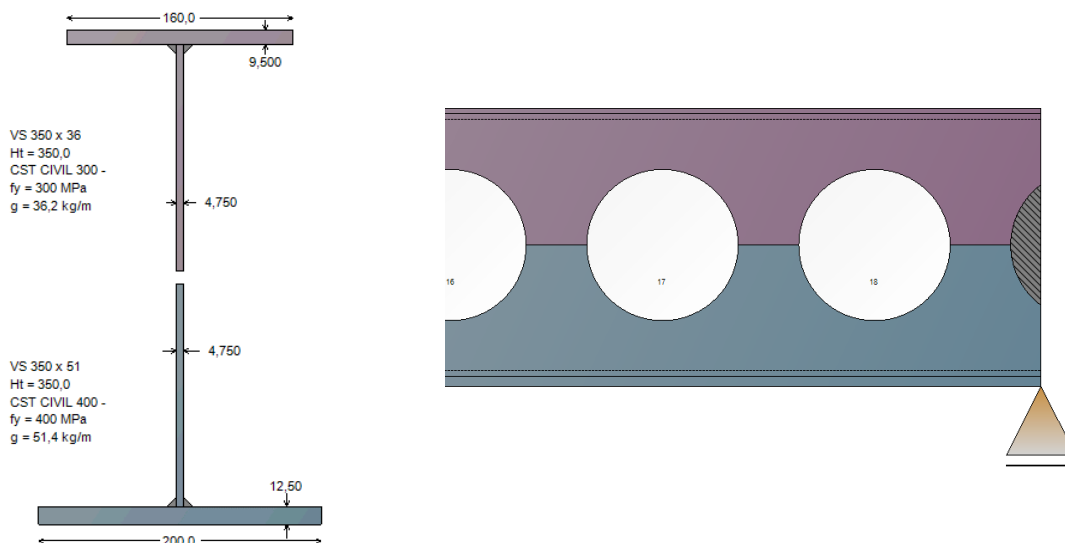
Nos edifícios de múltiplos pavimentos com estrutura de aço, geralmente o sistema de piso é misto, com a laje solidarizada às vigas por meio de conectores de cisalhamento, formando vigas mistas. Nessa situação, tem-se uma seção única, composta por dois materiais distintos, e uma única linha neutra. A linha neutra normalmente fica situada próximo à interface entre a laje e o perfil de aço, de modo que em regime elástico tem-se a distribuição de tensões de flexão mostrada na Figura 5.



**Figura 5 – Distribuição de tensões normais de flexão em regime elástico na laje de concreto e na viga de aço quando ambas trabalham solidárias na viga mista.**

Na configuração da Figura 5, a laje de concreto está totalmente comprimida, eliminando a tração no concreto, enquanto o perfil de aço é totalmente tracionado, evitando a instabilidade da alma e da mesa superior. Assim, toda a seção de aço contribui com sua capacidade máxima. Como as tensões são menores na metade superior do perfil, justifica-se o uso de uma seção monossimétrica, com uma seção mais leve no banzo superior, reduzindo-se o consumo de aço sem prejuízo do desempenho estrutural.

Tanto em vigas de alma cheia soldadas quanto em vigas celulares, os perfis são montados, permitindo a escolha das chapas dos banzos. É possível adotar seções híbridas, com aços diferentes em cada metade (Figura 6). Nas vigas de alma cheia, costuma-se modificar a mesa superior. Já nas vigas celulares, devido ao processo de corte e solda, é viável obter perfis monossimétricos a partir de metades de diferentes perfis (soldados ou laminados), combinando um tê mais leve no topo e outro mais robusto na base (Pereira, 2022).



**Figura 6 – Exemplo de uma seção monossimétrica híbrida para uma viga celular.**

### 1.3.5 Fabricação como perfil soldado

Uma viga celular pode, também, ser fabricada como um perfil soldado (Sakiyama, 2018). Neste caso, há três possibilidades:

- castelar uma tira de chapa plana, que constituirá a alma da viga, e, posteriormente, soldar as mesas utilizando o processo usual de fabricação de perfis soldados (Figura 7);
- abrir furos circulares numa chapa, que constituirá a alma da viga, e, posteriormente, soldar as mesas utilizando o processo usual de fabricação de perfis soldados (Figura 8);
- cortar um perfil I soldado, como mostrado nas Figuras 2 e 4.



Figura 7 – Corte e montagem de uma viga celular soldada.  
(fotos: Hermano Cardoso)



Figura 8 – Vigas celulares soldadas com furos cortados diretamente na chapa da alma.  
(fonte: <http://www.fabsec.co.uk> – acessado em 22/02/2012).

O processo de cortar as aberturas circulares diretamente na chapa, como mostrado na Figura 8, traz vantagens e desvantagens, tais como:

- a configuração dos alvéolos é mais livre, uma vez que não se depende do corte simétrico (o espaçamento e o tamanho dos alvéolos podem variar independentemente);
- podem-se fabricar vigas mais altas do que as que se consegue a partir dos perfis laminados ou soldados disponíveis no mercado;
- a perda de material é maior do que quando o corte é feito conforme mostrado na Figura 1a.

As vigas celulares tendem a ser mais leves do que um perfil de alma cheia de mesma altura, devido às aberturas na alma, viabilizando, por exemplo, a redução do peso de aço consumido. Entretanto, embora a viga celular propicie economia de aço em relação a um perfil de alma cheia de mesma altura, há que se considerar também o custo de corte e solda necessários para sua fabricação.

A diferença de custo entre a viga celular e um perfil de alma cheia equivalente varia de acordo com o local e a época, em função do preço do aço e da mão de obra para fabricação. Maior economia pode ser obtida na fabricação de vigas celulares quando se trata de produção em larga escala, com equipamentos automatizados que substituam a mão de obra.

#### 1.4 Nomenclatura

Os principais elementos geométricos de uma viga celular são identificados na Figura 9. Cada trecho de alma entre duas aberturas adjacentes é denominado “*montante de alma*”, e a distância entre os centros de duas aberturas adjacentes é denominada “*passo*” da viga.

Na Figura 9,  $a_0$  é o diâmetro das aberturas;  $e$  é o passo da viga;  $w$  é a largura do montante de alma;  $w_{end}$  é a largura do montante de alma extremo;  $H_t$  é a altura total do perfil expandido; e  $h_w$  é a altura da seção “T” no centro de uma abertura (ArcelorMittal Europe, 2018).

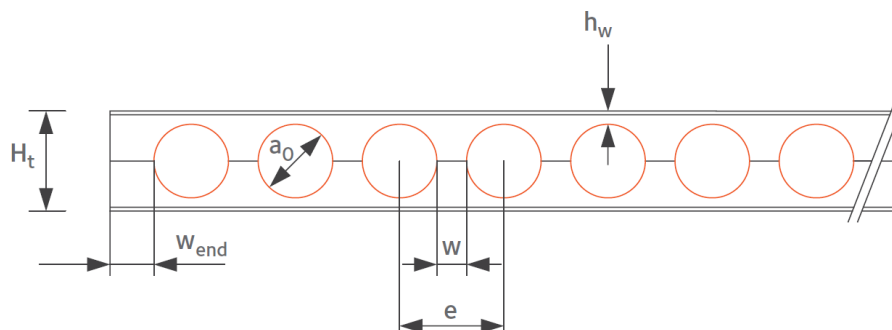


Figura 9 – Elementos geométricos de uma viga celular.  
(fonte: ArcelorMittal Europa, 2018)

## **2 APLICAÇÕES DE VIGAS CELULARES**

### **2.1 Generalidades**

O campo de aplicação das vigas celulares é bastante amplo, envolvendo estruturas com grandes vãos e pequenas cargas, ou que demandem aberturas nas vigas para a passagem de dutos, ou ainda como solução para atender exigências do partido arquitetônico, pela questão estética ou de extensão dos vãos.

As vigas celulares podem ser empregadas com vantagens tanto em sistemas de piso como em sistemas de cobertura de edificações com estrutura de aço. As aberturas na alma de uma viga celular modificam seu comportamento estrutural em relação a uma viga de alma cheia. Seu emprego é mais indicado para grandes vãos e carregamento uniformemente distribuído (Oliveira, 2012).

No caso de estruturas de grandes vãos sujeitas a pequenas cargas, as vigas celulares podem ser uma alternativa interessante por apresentarem maior rendimento estrutural em comparação com os perfis de alma cheia dos quais se originam. Com o processo de castelação, a altura total do perfil aumenta em relação ao perfil original, produzindo uma amplificação notável do momento de inércia em relação ao eixo forte, e isso tem consequências diretas na rigidez à flexão e na capacidade da viga ao momento fletor. Em supermercados e grandes lojas, por exemplo, como as coberturas geralmente possuem grandes vãos livres e cargas pequenas, as vigas celulares são uma alternativa interessante. O mesmo ocorre em vigas de coberturas e pisos de estações rodoviárias e ferroviárias.

Existe ainda um fator que influencia na escolha das vigas celulares e que, de certa forma, independe dos custos: o apelo estético. Com o desenvolvimento das construções com estrutura de aço, tem-se observado um interesse crescente na utilização de perfis celulares, com o objetivo de explorar o efeito estético que eles produzem no ambiente. Em geral, a configuração geométrica das vigas celulares permite maior expressão arquitetônica, conferindo maior leveza visual para os ambientes onde são aplicadas do que os perfis convencionais de alma cheia (Oliveira, 2012).

### **2.2 Integração de instalações**

Muitas vezes busca-se a redução do pé-direito dos andares de um edifício e, conseqüentemente, da altura total da edificação, o que possibilita:

- melhor aproveitamento do espaço vertical envolvendo, por exemplo, a viabilização de certos arranjos arquitetônicos e até a criação de novos pavimentos, sem contrariar o gabarito de construção do município;
- redução do volume e da área total construída, o que leva a menores custos de construção e, posteriormente, de operação e manutenção.

As vigas celulares em sistemas de piso de edifício viabilizam a acomodação de instalações técnicas, como sistema elétrico, hidráulico, ar-condicionado, dentre outros (Figura 10).

A passagem das instalações por dentro das aberturas tem duas implicações: a economia de espaço vertical e a melhor adaptação das edificações à tendência de abrigar uma quantidade cada vez maior de instalações. Os tipos de edificações que geralmente demandam um número maior de instalações são as de escritórios, hospitais e laboratórios.



Figura 10 – Whitehall Road, Leeds, Reino Unido.  
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)

### 2.3 Maior flexibilidade para o leiaute do pavimento

Além de permitir a passagem de instalações, as vigas celulares facilitam a criação de grandes espaços, com vãos que podem chegar a 18 m em sistemas de piso de edifícios. Na Figura 11 ilustra-se a comparação entre vãos vencidos por vigas celulares e vigas de alma cheia. Comparativamente, com vãos maiores reduz-se o número de pilares, permitindo maior flexibilidade na definição do leiaute do ambiente.

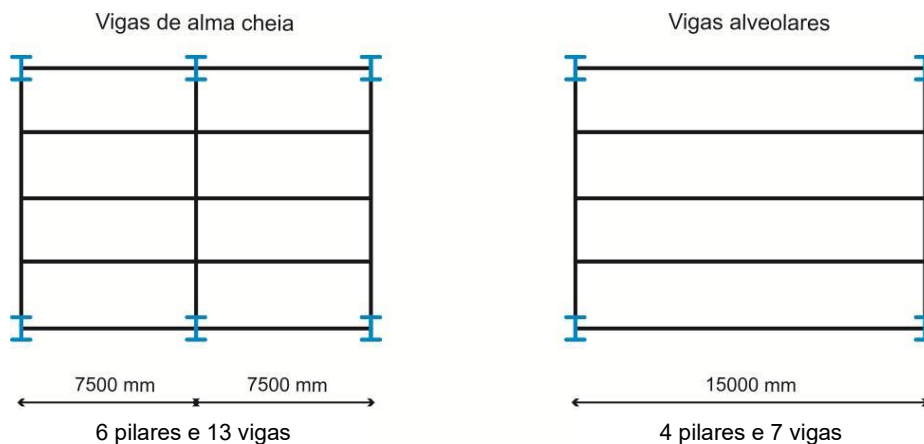


Figura 11 – Comparação entre pavimentos com viga de alma cheia e com viga celular.

## 2.4 Competitividade

Utilizando como base a comparação formulada pela CMC Steel (2012), ilustrada na Figura 12, pode-se observar que a solução com vigas celulares consome quase a mesma quantidade de aço que a alternativa com vigas de alma cheia. No entanto, a redução do número de pilares e fundações pode conduzir a uma economia considerável no custo da estrutura.

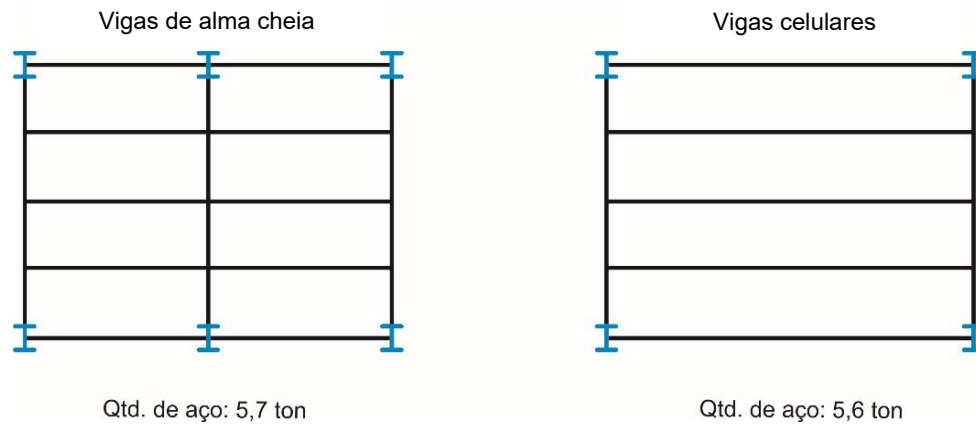


Figura 12 – Comparação do consumo de aço entre pavimentos com vigas de alma cheia e com vigas celulares.

## 2.5 Edifícios para estacionamento

As vigas celulares são uma alternativa interessante também para edifícios destinados a estacionamento, pois os vãos usuais para este tipo de edificação, entre 15 e 16 m, estão entre os vãos típicos da viga celular aplicada em sistemas de piso. A utilização de vigas celulares com contraflecha nesse tipo de edifício possibilita a construção de painéis de piso com ligeiro caimento, facilitando a drenagem.



Figura 13 – Sistema de piso de um estacionamento com vigas celulares.  
(Milton Keynes Car Park, Inglaterra – foto: Westok)

## 2.6 Sistemas de cobertura

Vigas celulares em coberturas permitem vencer grandes vãos e ampliam as possibilidades criativas para arquitetos e engenheiros, favorecendo soluções estruturais que valorizam sua estética em fachadas e ambientes internos (Figura 14).



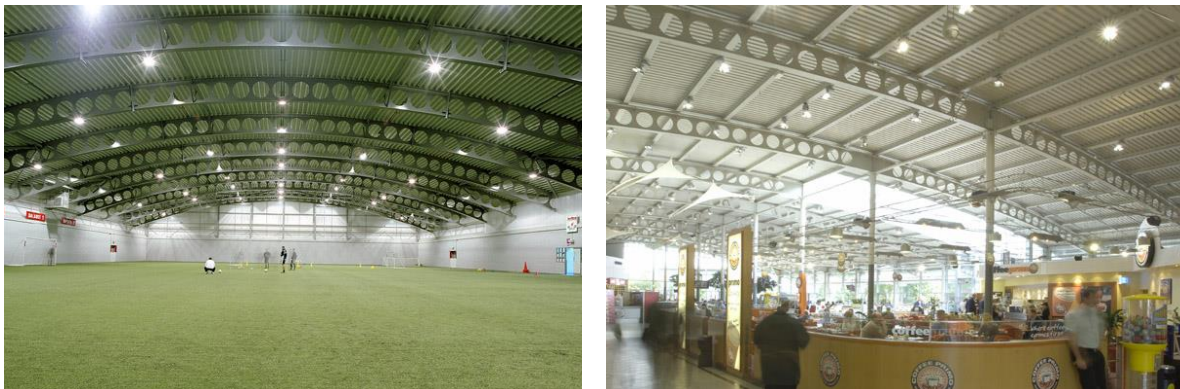
**Figura 14 – Holmes Place Fitness Club, Merton** (fonte: [www.westok.co.uk](http://www.westok.co.uk) – acessado em 11/05/2011);  
**e concessionária com viga alveolar com dupla curvatura**  
(fonte: <http://www.cmcsteelproducts.com> – acessado em 11/05/2011).

A aplicação mais usual para as vigas de eixo reto é na composição de sistemas de piso. Todavia, em alguns sistemas de cobertura se utilizam vigas celulares de eixo reto, como, por exemplo, em galpões e ginásios cobertos (Figura 15).



**Figura 15 – Cabines DIY Preston (21 m) e Piscina Fulham Broadway (26,5 m).**  
(fonte: [www.westok.co.uk](http://www.westok.co.uk) – acessado em 11/05/2011)

As vigas de eixo curvo podem ser utilizadas em grandes coberturas, como de ginásios, estações ferroviárias, supermercados, praças de alimentação, centros de convenções etc. (Figura 16).



**Figura 16 – Academia Liverpool FC (44 m) e South Mimms Services - Reino Unido.**  
(fonte: [www.westok.co.uk](http://www.westok.co.uk) – acessado em 11/05/2011)

O uso de vigas celulares em coberturas é vantajoso em relação às treliças por exigir menos tempo de fabricação, devido ao menor número de peças, e permitir o transporte já montadas, reduzindo custos com mão de obra. Elas podem vencer vãos de até 40 m, dependendo do tipo — reta, curva ou de altura variável.

As vigas com altura variável são projetadas para oferecer resistência aos esforços solicitantes de modo proporcional ao longo do vão. São comumente utilizadas para suporte de coberturas em balanço, como em arquibancadas (Figura 17), podendo possuir aberturas com diâmetro constante ou variável.



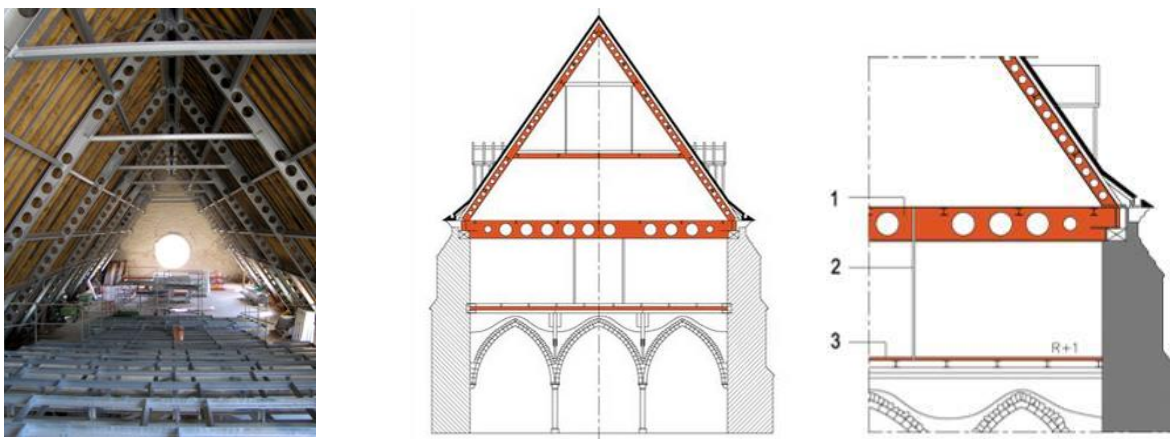
**Figura 17 – Hull KC Stadium (29 m) e Harlequins Rugby Club (12 m) – Reino Unido.**  
(fonte: [www.westok.co.uk](http://www.westok.co.uk) – acessado em 11/05/2011)

## 2.7 Requalificação de edificações antigas

As vigas celulares também podem ser utilizadas na requalificação ou na modernização de edifícios antigos, proporcionando leveza visual e minimizando interferências entre a estrutura nova e a antiga. Na Figura 18

são mostradas imagens de um projeto de restauração da estrutura de um convento do século XVI, onde a estrutura original de madeira foi substituída por vigas celulares. Esse edifício deixou de ser convento, foi sede do quartel de bombeiros, posteriormente foi utilizado como escola e, por fim, tornou-se um centro de conferências. Essa última mudança no uso exigiu que o espaço interno fosse reestruturado para dar lugar a um auditório. Os pisos originais, com vigas e pilares de madeira, foram substituídos por uma estrutura mista, composta por vigas celulares apoiadas sobre a alvenaria das paredes originais. Além de suportar a laje mista, as vigas celulares, com vão de 24 m cada, suportam dois tirantes que mantêm a laje do primeiro pavimento suspensa. Esse arranjo foi proposto para evitar a distribuição de cargas sobre a estrutura histórica do edifício.

A opção por vigas celulares, neste caso, permitiu solucionar a passagem dos dutos de instalações. Além disso, a regularidade das aberturas possibilita acrescentar novas instalações se necessário. O piso R+1, indicado no desenho mostrado na Figura 18, está suspenso a partir da viga celular no segundo pavimento para evitar a distribuição de cargas nas abóbadas de pedra da construção original do século XVI. A numeração no desenho corresponde sucessivamente a: (1) nova viga celular; (2) tirante; (3) piso suspenso.



**Figura 18 – Elevação do edifício principal e detalhes do apoio da nova estrutura.**  
(fonte: [www.constructalia.com](http://www.constructalia.com) – acessado em 13/12/2011)

### 3 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

#### 3.1 Generalidades

Vigas celulares e vigas de alma cheia possuem comportamentos estruturais bem diferentes. A presença das aberturas na alma da viga celular faz com que as tensões se distribuam de forma distinta da que se observa numa viga de alma cheia (Fakury, 2016; Grilo, 2018; Hechler et al., 2006; Teixeira, 2017; Pereira, 2019). Por essa razão, os modos de falha de uma viga celular diferem daqueles observados nos perfis de alma cheia (Kerdal & Nethercot, 1984; Silva, 2018; Justino, 2018; Valente, 2018; Faria, 2019; Ferreira et al., 2020).

## 3.2 Distribuição de esforços e tensões nas vigas celulares

As vigas de aço em pisos de edifícios geralmente possuem ligações flexíveis nas extremidades, pois são mais fáceis de fabricar e montar, além de garantirem que a viga trabalhe apenas com momento positivo — o que é vantajoso em sistemas mistos, permitindo à laje de concreto resistir à compressão. No caso típico de uma viga de aço de sistema de piso de edifício, biapoiada, sujeita a um carregamento uniformemente distribuído, as distribuições de momento fletor ( $M$ ) e de força cortante ( $V$ ) são aquelas representadas na Figura 19, em que o momento fletor é nulo nos apoios, onde a força cortante é máxima, e máximo no centro do vão, onde a força cortante é nula.

Devido à geometria dos perfis I, as mesas resistem principalmente à flexão e a alma ao cisalhamento. Entre o centro do vão e os apoios, a combinação de momento fletor ( $M$ ) e força cortante ( $V$ ) não é mais crítica que seus valores máximos isolados (Figura 19a), permitindo verificações separadas. No entanto, com aberturas na alma, surgem ao menos três condições distintas a considerar (Figura 19b):

- a retirada de parte da alma reduz a área resistente ao cisalhamento, podendo comprometer sua estabilidade, pois as porções da alma remanescentes acima e abaixo das aberturas passam a se comportar como elementos apoiado-livre (AL), em vez de apoiado-apoiado (AA), como ocorre na alma cheia;
- a presença das aberturas altera a distribuição das tensões em relação a um perfil de alma cheia, gerando altas concentrações de tensões normais e de cisalhamento ao redor dessas aberturas;
- devido às concentrações de tensões ao redor das aberturas, a interação  $M+V$  não pode ser desconsiderada, sendo necessária a verificação das tensões combinadas.

Assim, no caso das vigas celulares, cada seção no centro de uma célula deve ser verificada para o par  $M+V$  atuante naquela posição (Figura 19b). Se o carregamento é simétrico e a viga é biapoiada, basta verificar as células em uma metade da viga, porque as demais serão simétricas.

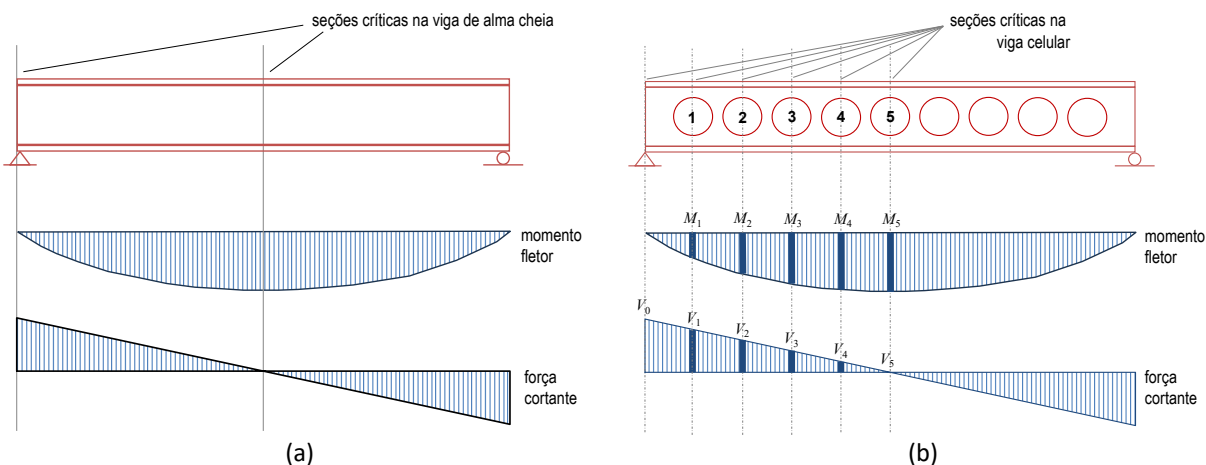


Figura 19 – Seções críticas em uma viga de alma cheia e em uma viga celular.

### 3.3 Modos de falha das vigas celulares

As vigas convencionais de aço, constituídas por perfis I de alma cheia, podem apresentar os seguintes modos de falha (Fakury et al., 2016):

1. plastificação total da seção por tensões normais;
2. flambagem local da mesa (FLM);
3. flambagem local da alma (FLA);
4. flambagem lateral com torção (FLT);
5. plastificação total da alma por cisalhamento;
6. instabilidade da alma por cisalhamento.

As vigas celulares podem apresentar os seguintes modos de falha (VCA, 2025):

1. falha por momento fletor na abertura crítica;
2. falha por força normal na abertura crítica;
3. falha por força cortante na abertura crítica;
4. falha devido à interação  $M+N$  na abertura crítica;
5. falha devido à interação  $N+V$  na abertura crítica;
6. falha devido à interação  $M+V$  na abertura crítica;
7. falha devido à interação  $M+N+V$  na abertura crítica;
8. falha devido à flambagem da alma por cisalhamento no montante crítico;
9. falha por cisalhamento no montante crítico;
10. falha devido à flambagem do montante crítico;
11. falha devido à flexão do montante crítico;
12. falha por cisalhamento no montante extremo;
13. falha por flambagem lateral com torção.

O cálculo de uma viga celular exige a verificação individual de cada abertura e montante, incluindo análises de estabilidade e tensões localizadas. Esse processo é complexo e só se torna viável com o uso de ferramentas computacionais.

### 3.4 Sobre a verificação dos modos de falha

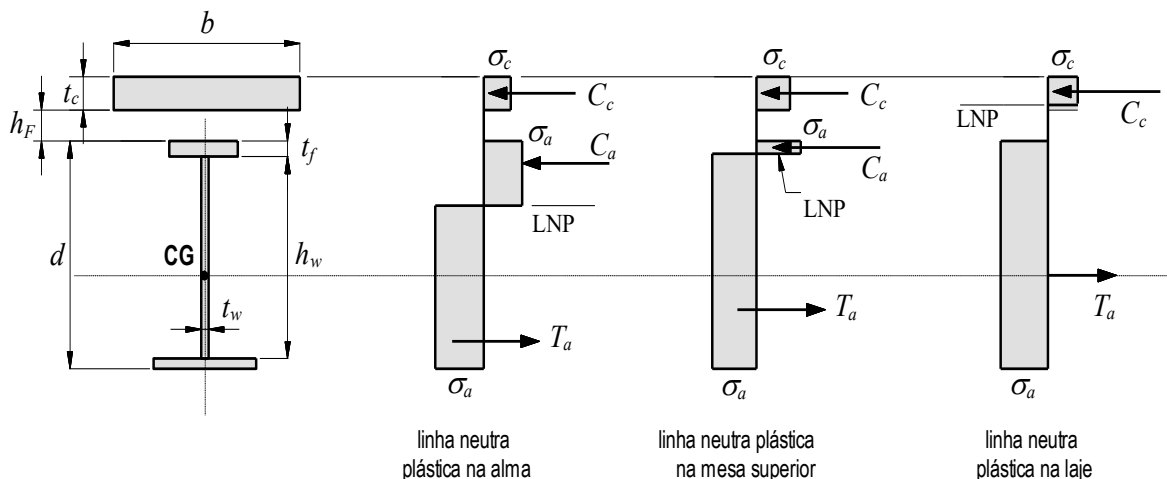
O comportamento estrutural de perfis alveolares ainda permanece como objeto de estudo. Existem diversas propostas de modelos e metodologias para verificação da capacidade resistente desses perfis frente aos modos de falha possíveis. No entanto, por se tratar de elementos de seção variável e com tipologias geométricas diversas, geralmente os modelos são complexos, e sua utilização no cálculo manual é proibitiva. Seu emprego é mais indicado via software.

O software **VCA+®**, disponibilizado pela ArceloMittal Brasil, permite verificar, de maneira simples e rápida, os Estados-Limites Últimos (ELU) e os Estados-Limites de Serviço (ELS) aplicáveis a vigas celulares de aço, mistas ou não, inclusive contemplando tipologias especiais como vigas curvas e vigas de altura variável.

### 3.5 Vigas celulares mistas

O mecanismo resistente à flexão nas vigas funciona por meio do equilíbrio entre duas forças de sentido contrário que atuam na seção transversal: uma resultante de compressão, que atua no centroide do banzo comprimido, e uma resultante de tração, que atua no centroide do banzo tracionado.

No caso das vigas mistas, tem-se uma mesa de concreto, constituída por uma faixa da laje, solidarizada a um perfil de aço. Como o concreto resiste bem à compressão e o aço à tração, a configuração ideal é aquela em que a linha neutra plástica (LNP) está posicionada exatamente entre a laje e o perfil. Mas nem sempre isso ocorre, podendo a LNP ficar situada dentro da laje ou dentro do perfil (Figura 20).



**Figura 20 – Distribuição de tensões e resultantes de forças em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo, com a LNP situada na alma, na mesa e na laje.**

Na Figura 20:  $\sigma_a$  = tensão no aço;  $\sigma_c$  = tensão no concreto;  $C_c$  = resultante de compressão na laje de concreto;  $C_a$  = resultante de compressão no perfil de aço;  $T_a$  = resultante de tração no perfil de aço.

Numa viga mista de aço e concreto, a tensão de compressão na laje,  $f_c$ , é máxima sobre a viga de aço e decresce não linearmente com a distância transversal ao eixo da viga, como representado na Figura 21. Para efeito de projeto, admite-se uma largura efetiva ( $b_{ef}$ ) que depende da espessura da laje, do vão da viga e do tipo de carregamento. Nos pontos de aplicação de cargas concentradas, por exemplo, as larguras efetivas são reduzidas. Para simplificar o tratamento, as normas adotam valores conservadores que podem ser usados para qualquer configuração de carregamento. Nos extremos da viga, considera-se que a largura efetiva da laje varia de zero até seu valor de cálculo, com uma inclinação de 2/3, conforme mostrado no esquema da Figura 22, que representa a laje de uma viga mista vista por cima.

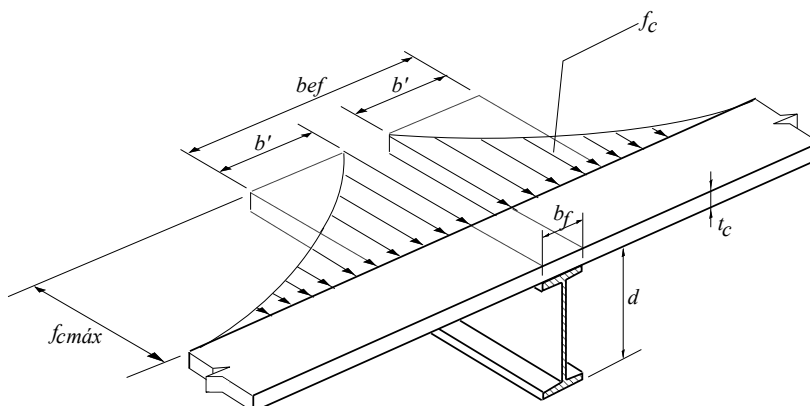


Figura 21 – Distribuição da tensão  $f_c$  e largura efetiva  $b_{ef}$ .

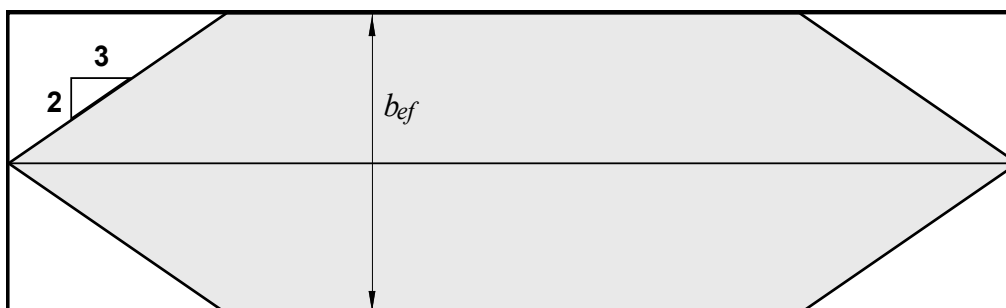


Figura 22 – Variação da largura efetiva da laje ao longo de uma viga mista.

A redução da largura efetiva da laje nas extremidades da viga diminui a compressão na laje, fazendo a linha neutra descer para dentro do perfil de aço. Com isso, o banzo superior passa a colaborar na compressão, equilibrando a tração no banzo inferior. Nessa situação, a mesa superior e a parte superior da alma ficam comprimidas e, se forem muito esbeltas, podem sofrer flambagem antes de atingir a tensão de escoamento, limitando a resistência da seção.

Em vigas de alma cheia, as tensões nas extremidades raramente são críticas para o dimensionamento. Já em vigas celulares, as aberturas podem elevar essas tensões a níveis críticos, tornando essencial limitar a esbeltez das mesas e da alma nos perfis utilizados. Perfis ideais devem ter uma razão  $d/b_f \approx 3$ , onde  $d$  é a altura total da seção e  $b_f$  a largura da mesa comprimida. Além disso, a esbeltez da mesa comprimida deve atender à seguinte condição:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 14 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (2)$$

onde  $t_f$  é a espessura da mesa.

### 3.6 Seções críticas em vigas celulares

Os mecanismos resistentes de vigas celulares diferem dos das vigas de alma cheia. As aberturas na alma modificam o fluxo de tensões, gerando pontos de concentração associados a esforços combinados.

Em vigas isoladas de alma cheia, o dimensionamento geralmente é controlado pelas tensões normais de compressão na mesa e na alma, que podem causar estados limites últimos ligados a FLM, FLA e FLT, e pelas tensões de cisalhamento na alma. Como a seção é constante e contínua, a capacidade resistente independe da posição ao longo da viga, tornando crítica a seção de maior momento fletor ou força cortante. Nas vigas celulares, as aberturas na alma criam uma descontinuidade, formando duas seções — uma acima e outra abaixo das aberturas — conectadas pelos montantes de alma. Nessas seções, surgem forças normais ( $N_m$ ) que geram um binário equilibrando o momento externo, enquanto o esforço cortante na seção líquida ( $V_m$ ) é repartido entre os banzos superior e inferior conforme suas áreas de cisalhamento (ver Figura 23.a).

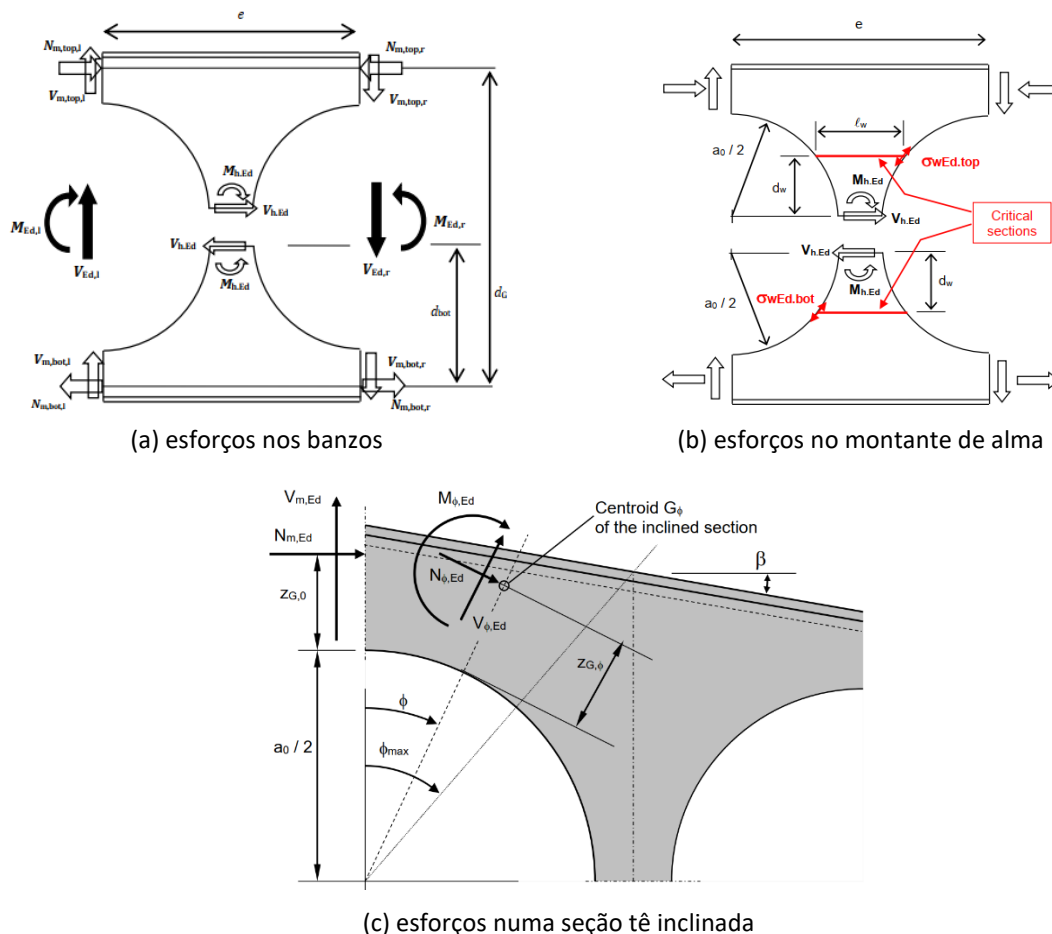


Figura 23 - Esforços internos em uma viga celular.

No montante de alma, o deslizamento relativo entre a parte superior e inferior da viga celular é impedido por uma resistência ao cisalhamento horizontal ( $V_h$ ) na emenda entre as duas metades do perfil celular (Figura 23.b). A transição dos esforços internos da seção no centro de uma abertura para a seção do montante provoca tensões de compressão no montante de alma ( $\sigma_w$ ), fazendo-se necessária a verificação da estabilidade do montante em uma seção crítica distante de  $d_w$  do eixo central das aberturas (Figura 23.b). A força normal e a força cortante nas seções dos tês são excêntricas em relação às seções tê inclinadas que acompanham a abertura circular na região dos banzos, provocando esforços internos de momento fletor ( $M_f$ ), força cortante ( $V_f$ ) e esforço normal ( $N_f$ ), todos função do ângulo de inclinação  $\phi$  medido a partir do eixo vertical das aberturas (Figura 23.c).

Considerando uma viga biapoiada com carregamento distribuído, a seção crítica passa a não ser necessariamente no centro do vão, onde o momento fletor externo é máximo, mas sim a seção tê inclinada de um ângulo  $\phi$  com a maior resultante de momento fletor provocado pela atuação excêntrica de  $N_m$  e  $V_m$ , de acordo com a Eq.(4).

$$M_\phi = N_m e_N + V_m e_V \quad (3)$$

onde: 
$$e_N = \frac{a_0}{2} + z_{G,0} - \left( \frac{a_0}{2} + z_{G,0} \right) \cos(\phi) \quad \text{braço de alavanca de } N_m \quad (4)$$

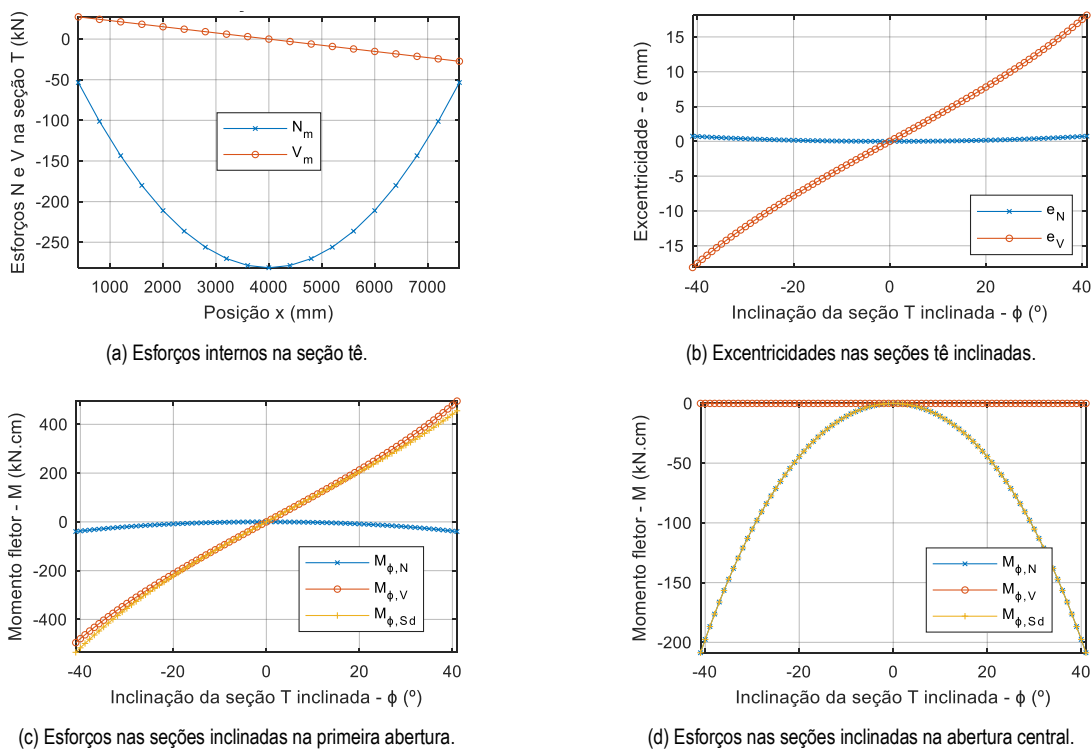
$$e_V = \left( \frac{a_0}{2} + z_{G,0} \right) \sin(\phi) \quad \text{braço de alavanca de } V_m \quad (5)$$

Nota-se que o momento resultante  $M_\phi$  é função dos braços de alavanca  $e_N$  e  $e_V$  das componentes de força  $N_m$  e  $V_m$  que atuam na seção transversal dos banzos. A força normal  $N_m$  é diretamente proporcional ao momento solicitante externo, enquanto a força cortante  $V_m$  é proporcional ao esforço cortante na viga (Figura 24.a). A força normal  $N_m$  máxima ocorre no centro do vão, onde o momento fletor solicitante é máximo, ao passo que a força cortante  $V_m$  normalmente atinge seu maior valor próximo aos apoios. Por outro lado, verifica-se que o braço de alavanca  $e_V$  da força cortante  $V_m$  é superior ao braço de alavanca  $e_N$  da componente  $N_m$ , como mostrado no gráfico da Figura 24.b. Na seção tê com maior inclinação ( $\pm 41^\circ$ ), a excentricidade  $e_V$  é 25 vezes maior do que a excentricidade  $e_N$ . Assim, o momento resultante máximo  $M_\phi$  na seção tê dos banzos tende a ocorrer na seção onde a força cortante é máxima, ou seja, próximo aos apoios, um fenômeno contraintuitivo, se comparado ao que se observa nas vigas de alma cheia.

Na Figura 24.c e na Figura 24.d são mostradas as componentes  $M_{\phi,N}$  e  $M_{\phi,V}$  e o momento solicitante total  $M_{\phi,Sd}$  nas seções inclinadas na primeira abertura próxima ao apoio e na abertura no centro do vão, respectivamente, para uma determinada viga celular. Verifica-se que o momento  $M_{\phi,Sd}$  máximo acontece na primeira abertura, com o valor de 516,5 kN.cm, enquanto o maior momento na abertura central é de apenas 208,7 kN.cm.

Nas vigas celulares biapoiadas com carga distribuída, as seções críticas para o dimensionamento no ELU podem estar na seção-tê inclinada próxima a uma abertura extrema ou no montante de alma mais próximo do apoio. No primeiro caso, o carregamento é controlado pelo momento resistente da seção-tê; no segundo, pela resistência ao cisalhamento horizontal e pela estabilidade do montante de alma.

O dimensionamento à flexão de uma viga celular em perfil I soldado envolve: (1) a verificação da flexão em perfis T monossimétricos, com a mesa superior comprimida; e (2) a verificação da estabilidade do montante de alma. A capacidade resistente depende das propriedades geométricas do perfil original, dos parâmetros de corte e das dimensões da viga celular, tornando complexa a relação entre esses fatores e dificultando a escolha do melhor perfil e da melhor configuração das aberturas.



**Figura 24 - Excentricidades e esforços internos nas seções T inclinadas no banzo superior de uma viga celular.**

A redução da altura do perfil pode aumentar o esforço normal da seção tê, para compensar a redução do braço de alavanca entre os centroides dos banzos, podendo provocar a falha por flexão nas seções tê inclinadas devido ao aumento do momento fletor secundário resultante.

A relação  $a_0/d$  pode influenciar de forma contraintuitiva a capacidade da viga celular. Embora se espere que aberturas maiores reduzam a resistência, em certos casos aumentar essa relação pode melhorar a capacidade da viga. Esse efeito inesperado ocorre por conta dos seguintes fatores:

- valores muito altos de  $a_0/d$  podem gerar seções líquidas (seções tês) muito baixas para resistir aos momentos fletores, exigindo a redução do diâmetro das aberturas;
- valores muito baixos de  $a_0/d$  podem originar seções líquidas nas aberturas (seções tês) com um pedaço de alma muito esbelto, penalizando a estabilidade da alma; nessas situações, a solução é aumentar o diâmetro do furo.

A capacidade da viga celular é proporcional à relação  $e/a_0$ . Aumentar o passo ( $e$ ) aumenta a largura do montante de alma, elevando a área de cisalhamento horizontal e reduzindo a esbelteza do montante. Isso resulta em maior resistência ao cisalhamento horizontal e à flambagem do montante.

## 4 PROJETO DE VIGAS CELULARES

### 4.1 Critérios para projeto

#### 4.1.1 Tamanho e espaçamento dos alvéolos

Ao contrário das vigas casteladas, o corte para a fabricação de vigas celulares não exige simetria entre a largura do montante e o lado horizontal do alvéolo. Isso permite maior flexibilidade no espaçamento entre aberturas, independentemente do seu diâmetro. Na Figura 25, estão expressas as faixas de variação tanto do diâmetro como do espaçamento das aberturas.

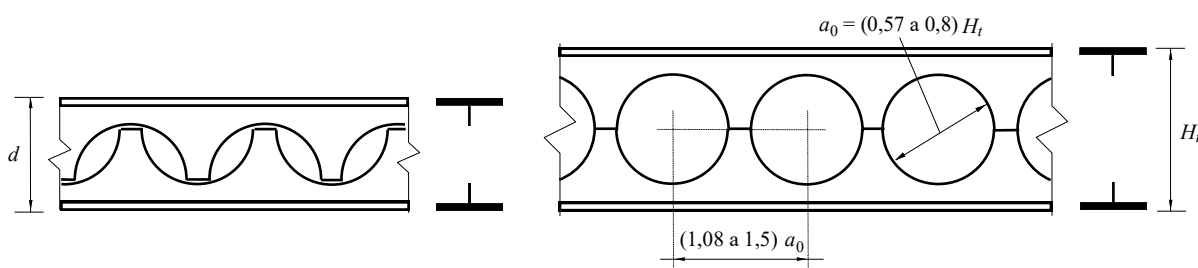


Figura 25 – Corte das vigas celulares e faixas de variação do passo e do diâmetro das aberturas.

Variar o tamanho e o espaçamento das aberturas nas vigas celulares oferece vantagens, como:

- maior flexibilidade de aplicação, permitindo configurar vigas adequadas para coberturas ou pisos;
- maior liberdade de projeto, facilitando a posição das aberturas para simplificar as ligações com outras vigas.

Para o corte de vigas celulares a partir de um perfil original, existe uma extensa gama de combinações possíveis de diâmetros e de distância entre aberturas. De modo geral, a escolha pela combinação mais adequada leva em conta dois principais critérios de otimização:

- a relação entre a altura final e o peso da viga celular;
- a relação entre o carregamento e o peso da viga celular.

Em ambos os casos, o ajuste final de alguns milímetros de distância entre eixos das aberturas permite que as extremidades das vigas sejam obtidas com alma cheia (sem aberturas), facilitando as ligações nessa região.

#### 4.1.2 Razão de expansão e relações geométricas para vigas celulares

Na Tabela 1 são apresentadas as razões de expansão e as relações  $a_0/d$  e  $e/a_0$  propostas pela ArcelorMittal para sistemas de piso e para sistemas de cobertura.

Tabela 1 – Razões de expansão e relações  $a_0/d$  e  $e/a_0$  propostas pela ArcelorMittal para vigas celulares.

	Sistemas de Piso	Sistemas de Cobertura
$k$	1,3 a 1,4	1,4 a 1,6
$a_0/d$	0,8 a 1,1	1,0 a 1,3
$e/a_0$	1,2 a 1,7	1,1 a 1,3

Para garantir que as combinações de  $k$ ,  $a_0/d$  e  $e/a_0$  resultem em situações passíveis de fabricação, consultar o trabalho de Oliveira (2012).

#### 4.2 Detalhes construtivos

Algumas aplicações de vigas celulares exigem soluções específicas para a disposição das aberturas e montantes, diretamente ligadas às decisões de projeto e ao cálculo estrutural. Essas soluções, específicas para cada caso, devem garantir custo competitivo e viabilidade de execução.

##### 4.2.1 Aberturas preenchidas

Em certos casos, devido à alta força cortante próxima aos apoios ou a requisitos específicos, como resistência ao fogo, pode ser necessário fechar completamente algumas aberturas, preenchendo-as com chapas compatíveis com a alma do perfil (Figura 26). Em alguns casos, não é preciso preencher totalmente a abertura (Figura 33). Essa solução é usada principalmente para facilitar a ligação entre vigas principais e secundárias.



Figura 26 – Abertura preenchida (fonte: [www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com) – acessado em 13/12/2011).

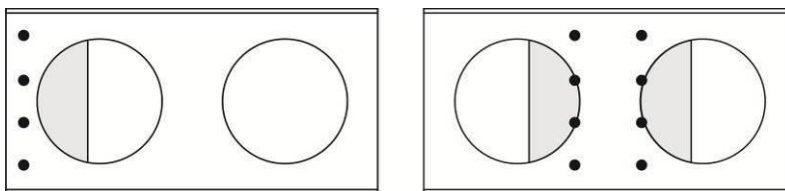


Figura 27 – Fechamento parcial das aberturas.

Na fase de projeto, é possível definir o passo (distância entre aberturas) e o espaçamento das aberturas próximas aos apoios, permitindo ajustar a posição dos montantes conforme a necessidade de ligações intermediárias entre vigas. O fechamento parcial das aberturas para facilitar essas ligações é mais simples e econômico que o fechamento total (Figura 27).

#### 4.2.2 Reforço das aberturas

Há casos em que, devido à magnitude da força cortante na região próxima aos apoios, faz-se necessário reforçar as aberturas. Se, por alguma razão, não for possível fechá-las, como descrito em 4.2.1, pode-se reforçar a abertura introduzindo um enrijecedor em forma de anel, soldado ao longo do contorno para aumentar sua rigidez (Figura 28), ou acrescentando enrijecedores horizontais acima e abaixo das aberturas críticas (Figura 29).

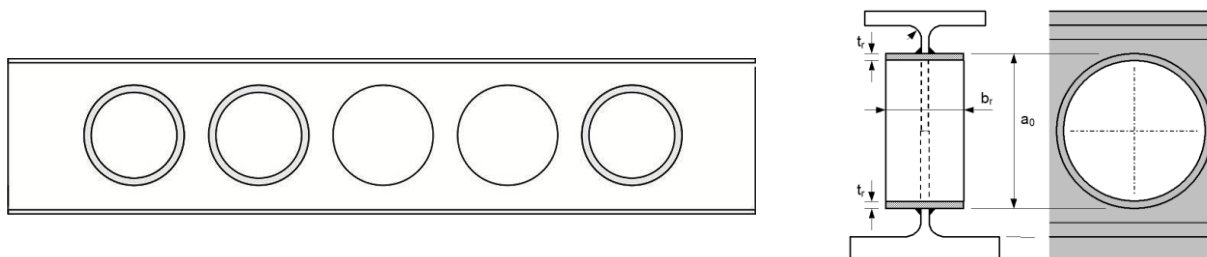


Figura 28 – Reforço com enrijecedor de anel soldado na borda da abertura.

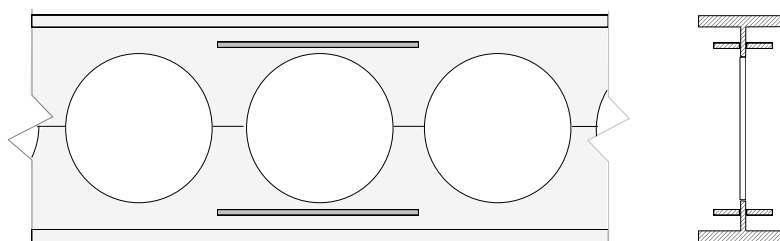


Figura 29 – Enrijecedores horizontais de alma acima e abaixo de uma abertura.

### 4.2.3 Enrijecimento do montante

Eventualmente, durante a verificação do dimensionamento para o modo de falha por flambagem do montante de alma, pode-se identificar a necessidade de enrijecimento de algum dos montantes da viga. Estudos demonstram que a aplicação de enrijecedores de alma no montante crítico (Figura 30a), ou a instalação de segmentos de anéis como enrijecedores aplicados na borda das aberturas (Figura 30b), são alternativas eficazes para estabilização do montante de alma (Oliveira, 2012).

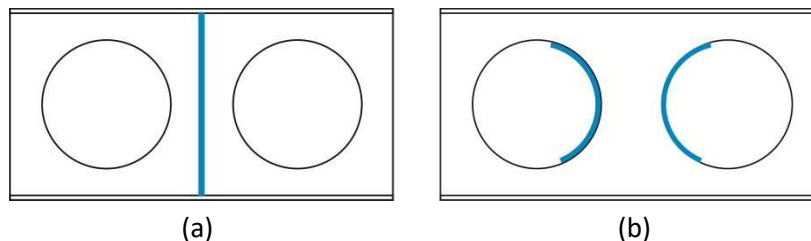


Figura 30 – Enrijecedores no montante e nas aberturas.

### 4.2.4 Cargas concentradas

Quando uma força concentrada atua sobre a mesa superior de uma viga celular, pode-se preencher as aberturas na região da força concentrada e, ainda, acrescentar enrijecedores transversais na alma, na linha de atuação da força (Figura 31):

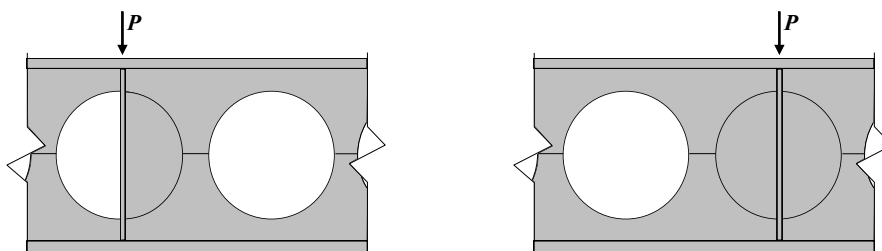


Figura 31 – Enrijecedores de alma sob força concentrada atuando sobre uma abertura.

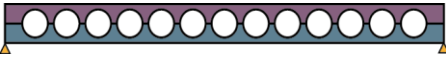
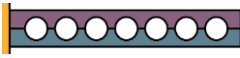
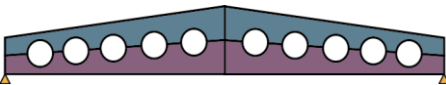
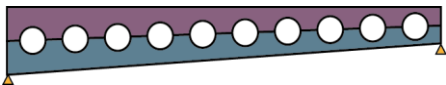
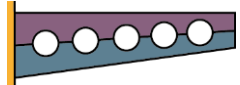
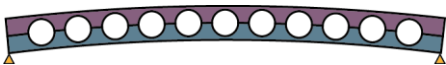
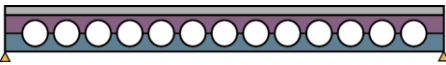
## 5 CÁLCULO DE VIGAS CELULARES COM O VCA+

O software VCA+ (Viga Celular Arcelor) é a versão brasileira do ACB (Arcelor Cellular Beams), desenvolvido na França pelo CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique), a pedido da ArcelorMittal Europa. O VCA+ é um software projetado para auxiliar no projeto de vigas celulares, compatível com as normas brasileiras da ABNT para projeto de estruturas de aço. O software é capaz de verificar o dimensionamento de vigas celulares isoladas, vigas celulares mistas e vigas com aberturas especiais na alma (AEA), fabricadas a partir de perfis soldados disponíveis no catálogo da ArcelorMittal Brasil (AMB). As vigas podem ser fabricadas por meio da soldagem de duas metades (ou banzos), obtidas do corte de um perfil soldado, criando aberturas circulares, geralmente com diâmetro constante, regularmente espaçadas ao longo da viga, ou pelos processos alternativos indicados em 1.3.5.

### 5.1 Escopo geral de aplicação do software VCA+

As tipologias de vigas celulares contempladas no software estão listadas na Tabela 2. Todas as tipologias de vigas citadas podem ser verificadas como vigas biapoiadas. Vigas de eixo reto e vigas de altura variável com uma inclinação também podem ser consideradas como vigas em balanço.

Tabela 2 – Tipos de vigas celulares contempladas no software VCA+.

Tipos		Vigas biapoiadas	Vigas em balanço
Vigas de aço isoladas	Viga de eixo reto com altura constante		
	Vigas de altura variável		X
			
	Vigas curvas		X
Vigas mistas	Viga de eixo reto com altura constante		X

### 5.2 Configuração e opções do software

O usuário pode configurar os coeficientes de ponderação das ações, o endereço das pastas dos arquivos de dados e dos bancos de dados de perfis, de *steel-deck* e de conectores de cisalhamento, bem como o nível de detalhe do relatório de projeto. Os parâmetros de corte e as faixas de variação de uma série de parâmetros das vigas celulares já vêm previamente definidos no software.

O usuário tem liberdade de especificar os coeficientes de ponderação, bem como os fatores de combinação e os coeficientes de resistência dos materiais (Figura 32).

**Coef. de ponderação das ações**

$\gamma_{g,sup}$  1,400  
 $\gamma_{g,inf}$  1,000  
 $\gamma_q$  1,500  
 $\gamma_{g,fi}$  1,100

**Fatores de combinação**  
 Fator padrão aplicado às ações variáveis

$\psi_0$  0,70  
 $\psi_1$  0,60  
 $\psi_2$  0,40

**Coeficientes de resistência**

	Aço	Laje	Incêndio
$\gamma_{a1}$	1,100	$\gamma_c$ 1,400	$\gamma_{M,fi}$ 1,000
$\gamma_{a2}$	1,350	$\gamma_{cs}$ 1,250	$\gamma_{c,fi}$ 1,000
		$\gamma_{si}$ 1,100	$\gamma_{V,fi}$ 1,000

Importar os valores recomendados dos fatores de combinação da Tabela 2 da NBR8800:2024

Locais onde não há predominância de pesos e equipamentos que permaneçam por longos períodos, nem alta concentração de pessoas

Locais onde há predominância de pesos e equipamentos que permanecem por longos períodos ou alta concentração de pessoas

Bibliotecas, arquivos, armazéns, oficinas, garagens, sobrecarga de cobertura

Figura 32 – Aspecto da janela para configuração dos coeficientes de segurança.

### 5.3 Parâmetros gerais da viga celular

Na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 33), pode-se definir se a viga é de aço isolada ou se é mista, se é uma viga celular ou uma viga com aberturas especiais na alma, se é biapoiada ou em balanço. No caso das vigas celulares, pode-se definir se a viga é de eixo reto, ou de eixo curvo, ou de altura variável.

Parâmetros gerais

Modificar a vigas V1 1 | Criar uma nova viga V1 2

Tipo da viga

Viga de aço  
 Viga mista

Vigas celulares | Vigas com aberturas

Viga reta com altura constante  
 viga celular de altura variável com uma inclinação  
 viga celular de altura variável com duas inclinações  
 Viga curva

Apoios extremos

Viga simplesmente apoiada  
 Viga em balanço

Orientação

Mesa superior horizontal  
 Mesa inferior horizontal

Assistente

Usar o assistente

Cancelar | OK

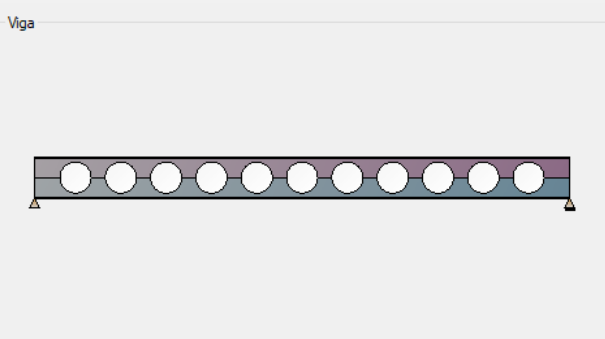


Figura 33 – Janela de configuração dos parâmetros gerais da viga.

Na Figura 34 são mostradas imagens da janela de definição dos parâmetros da seção transversal. Nessa janela, pode-se selecionar se a seção é monossimétrica ou duplamente simétrica, o perfil base de cada banzo, e o aço de cada banzo.

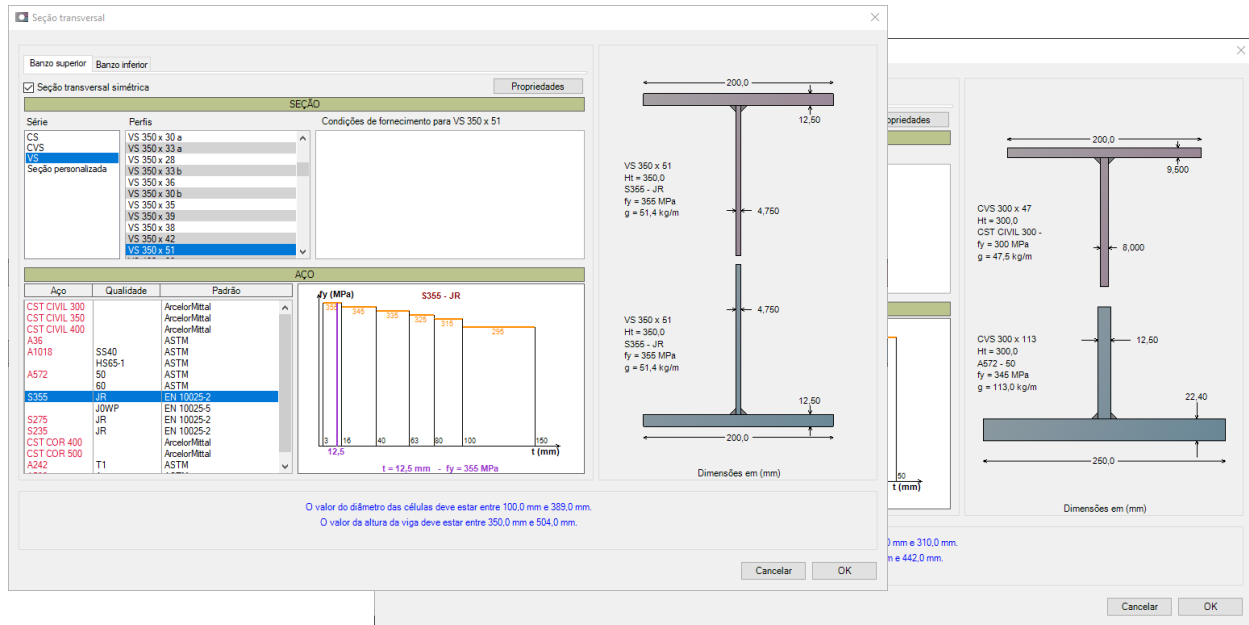


Figura 34 – Janela para configuração da seção transversal da viga.

#### 5.4 Viga celular mista

Quando o usuário seleciona “viga mista” na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 35), o programa disponibiliza o acesso à janela de configuração dos parâmetros da laje, onde se podem selecionar ou definir os parâmetros da laje, do *steel-deck*, do conector de cisalhamento, da disposição dos conectores e da armadura transversal para controlar o cisalhamento longitudinal da laje (Figura 36).

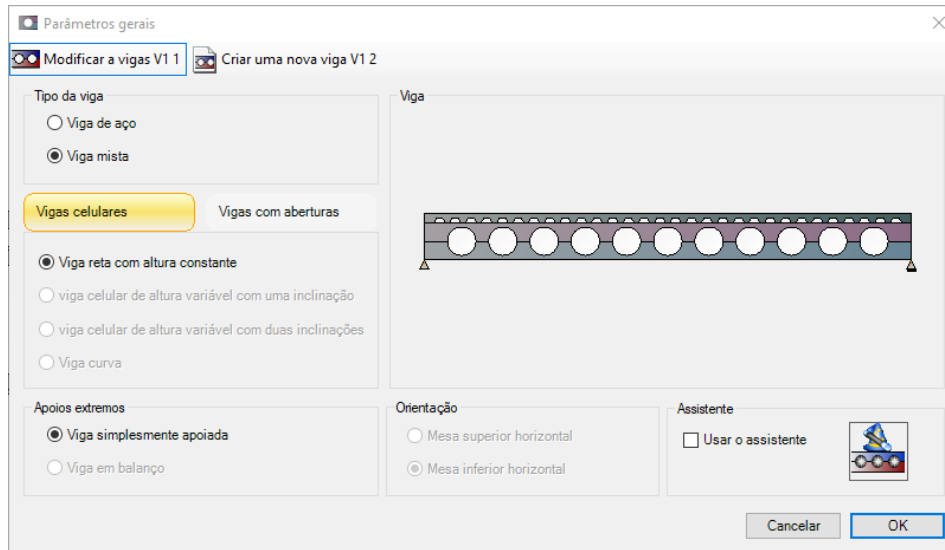


Figura 35 – Seleção de viga mista na janela de parâmetros gerais da viga.

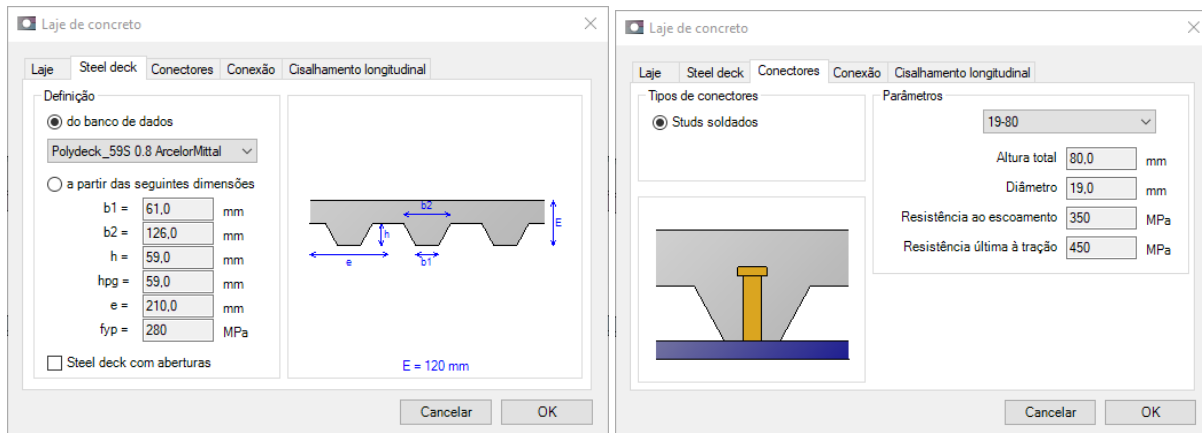


Figura 36 – Janela para configuração dos parâmetros da laje, no caso de viga celular mista.

### 5.5 Viga celular de altura variável

Para o caso de viga celular de altura variável com uma inclinação, pode-se escolher entre duas configurações possíveis de condições de apoio: viga biapoiada ou viga em balanço. Para viga celular de altura variável com duas inclinações, apenas a condição de viga biapoiada está disponível.

## 5.6 Viga celular curva

Para o caso de “viga curva” (Figura 37), apenas a condição de viga biapoiada fica disponível.



Figura 37 – Seleção de viga celular curva na janela de parâmetros gerais da viga.

## 5.7 Viga com aberturas especiais na alma

O VCA+ também contempla o caso de “viga com aberturas especiais” (Figura 38), permitindo definir o formato, a posição e as dimensões de uma ou mais aberturas na alma.

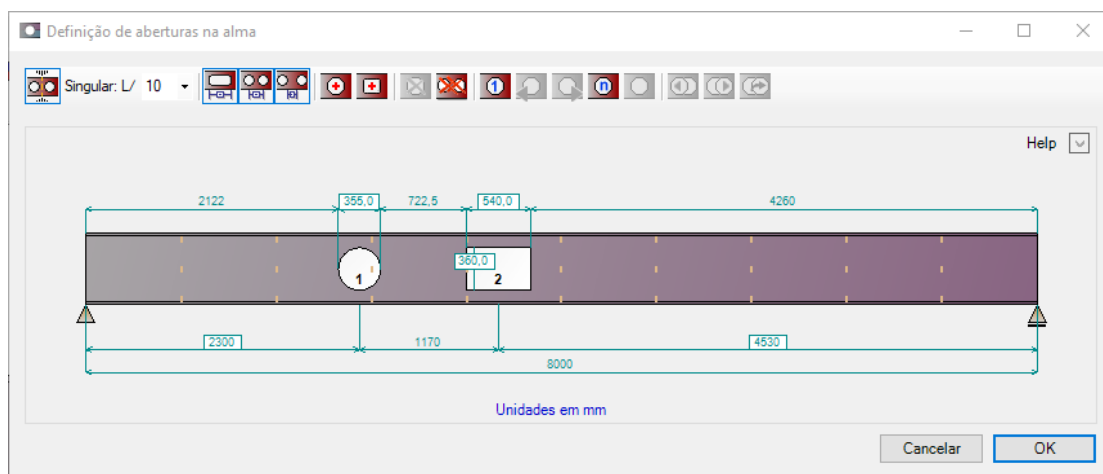


Figura 38 – Janela para definição de aberturas especiais na alma da viga.

## 5.8 Recursos do software

A partir dos parâmetros definidos pelo usuário, o **VCA+** calcula as propriedades da seção transversal, bem como as forças internas e momentos nas seções críticas ao longo da viga, para os diferentes casos de carga e combinações de ações, verificando os estados-limites últimos e de serviço. Calcula flechas e frequência de vibração, avalia as vibrações de acordo com o método europeu Hivoss (Feldman et al., 2010) e verifica o comportamento de vigas celulares de eixo reto em situações de incêndio.

Os cálculos das vigas celulares são baseados nos modelos mecânicos dos Eurocódigos e compatibilizados com os critérios das normas brasileiras. Como resultado de pesquisas do CTICM, financiadas pela ArcelorMittal, formulações específicas são consideradas para determinar a resistência à estabilidade dos montantes de alma intermediários, bem como as deformações e deslocamentos.

Para vigas com aberturas especiais na alma (AEA), os cálculos são baseados no projeto de norma europeia prEN 1993-1-13 (2018) ou no anexo da prEN 1994-1-1 (2017). Um modelo de cálculo específico é considerado para as flechas (Martin et al., 2006).

## 5.9 Modelos de cálculo

O **VCA+** realiza verificações de resistência para os ELU (resistência da seção transversal, flambagem local, flambagem lateral com torção) de acordo com os princípios da ABNT NBR 8800:2025 e da ABNT NBR 14323:2013. No Relatório de Projeto, os critérios de resistência são apresentados como uma taxa  $\Gamma$  dada pela razão entre a solitação de cálculo (esforços com índice "Ed") e a resistência de cálculo (esforços com índice "Rd"). A taxa de solitação ao momento fletor, por exemplo, é expressa por:

$$\Gamma_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \quad (6)$$

O critério de resistência é atendido quando a taxa é menor ou igual a 1,0.

O programa verifica todas as aberturas de alma sequencialmente. Se uma abertura for preenchida, a seção transversal em seu eixo médio é verificada como uma seção transversal do montante de alma.

Na região da abertura, a força axial nas seções T é calculada como o momento de flexão dividido pelo espaçamento entre os eixos centroidais das seções T inferior e superior. A força cortante é considerada dividida entre as duas seções T em proporção às suas respectivas áreas de cisalhamento. As forças axiais e de cisalhamento nas seções T (Figura 39) são exibidas no relatório preliminar de projeto (intermediário ou detalhado).

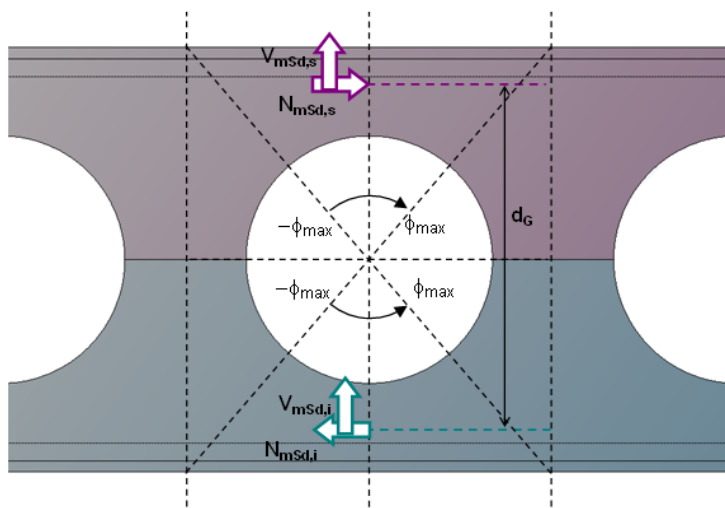


Figura 39 – Forças axiais e forças cortantes nos tês no centro de uma abertura.

Ambas as seções T inferior e superior são verificadas. Adicionalmente, seções transversais com ângulos de inclinação em relação ao eixo transversal da viga variando de  $-\phi_{\max}$  a  $+\phi_{\max}$ , com incremento de 1 grau são verificadas. Para cada seção transversal inclinada (associada a um ângulo  $\phi$ ), os seguintes critérios de resistência são considerados:

- força axial:  $\Gamma_N = N_{Ed} / N_{Rd} \leq 1,0$
- momento fletor:  $\Gamma_M = M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$
- força cortante:  $\Gamma_V = V_{Ed} / V \leq 1,0$
- interação M+N:  $\Gamma_{MN} \leq 1,0$
- interação N+V:  $\Gamma_{NV} \leq 1,0$
- interação M+V:  $\Gamma_{MV} \leq 1,0$
- interação M+N+V:  $\Gamma_{MNV} \leq 1,0$

### 5.10 Resultados produzidos pelo VCA+

O **VCA+** processa a viga quando o usuário solicita o relatório de projeto preliminar. O usuário pode alterar o nível de detalhe diretamente no visualizador do relatório. No modo “relatório detalhado”, o **VCA+** fornece todos os dados geométricos da viga e da seção transversal. Além disso, apresenta os resultados das verificações em ELU, em ELS e em situação de incêndio.

## 5.11 Pré-dimensionamento e verificação do dimensionamento no VCA+

### 5.11.1 Vigas celulares de eixo reto

Para o pré-dimensionamento de vigas celulares de eixo reto, recomenda-se seguir o seguinte procedimento, considerando sempre perfis VCS:

1. estimar a altura total da viga celular a partir da relação  $H_t = L/20$ ;
2. estimar a altura aproximada do perfil base fazendo:

$$d = \frac{H_t}{1,5}, \text{ considerando que a taxa de expansão ótima é } k = 1,5 = \frac{H_t}{d} \quad (7)$$

3. determinar a espessura mínima da alma a partir da relação:

$$t_w \geq \frac{H_t}{3,94 \sqrt{E/f_y}} \quad (8)$$

Para a verificação da viga no **VCA+**:

1. selecionar um perfil VCS com  $H_t$  e  $t_w$  de acordo com os valores obtidos no pré-dimensionamento;
2. na janela onde se configuram os parâmetros de corte, fixar o valor de  $H_t$  e deixar o programa variar livremente os valores do diâmetro das aberturas ( $a_0$ ) e da relação passo/diâmetro ( $e/a_0$ );
3. selecionar a última solução (com maior relação  $e/a_0$ );
4. na sequência, definir eventuais pontos de contenção lateral, se houver, e informar o carregamento e as combinações de ações (as janelas para definição de aberturas preenchidas e enrijecedores de alma só devem ser acionadas posteriormente em caso de problemas);
5. processar a viga.

Se a viga não atender aos critérios de ELU, reduzir o diâmetro das aberturas em cerca de 5% e permitir que o software proponha novas relações  $e/a_0$ . Caso o software proponha mais de uma solução com diferentes relações  $e/a_0$ , escolher a maior delas.

Se ficar evidente que as aberturas ou montantes extremos estejam com capacidade deficiente, alternativamente pode-se testar o preenchimento das aberturas ou o enrijecimento dos montantes com déficit de capacidade resistente. Esse procedimento está representado na forma de um fluxograma na Figura 40.

### 5.11.2 Vigas celulares de eixo curvo

Para o pré-dimensionamento de vigas celulares de eixo curvo a serem verificadas com o VCA+, recomenda-se o seguinte procedimento, considerando preferencialmente perfis da série VCS:

- 1) estimar a altura do perfil celular admitindo os seguintes critérios:

$$H_t^* \cong L/21 \quad \text{para } 7,5 \text{ m} \leq L \leq 9,0 \text{ m} \quad (9)$$

$$H_t^* \cong L/25 \quad \text{para } L > 9,0 \text{ m} \quad (10)$$

2) altura total do perfil base:  $d^* \cong \frac{H_t^*}{1,2} \quad (11)$

3) diâmetro das aberturas:  $a_0^* \cong 0,84d^* \quad (12)$

4) raio mínimo de curvatura:  $R^* = \frac{a_0^*}{4} \frac{E_a}{f_y} \quad (13)$

5) flecha do arco:  $\delta^* = R^* - \frac{\sqrt{4R^{*2} - L^2}}{2} \quad (14)$

Esse procedimento está representado na forma de um fluxograma na Figura 41.

Estimando o raio mínimo de curvatura da viga, pode-se calcular a flecha correspondente a esse raio, o que permite ao projetista definir o desenho da viga em arco dentro dos limites físicos da resistência e da estabilidade do material. Posteriormente, quando é feita a verificação do dimensionamento, os valores de  $d$ ,  $H_t$ ,  $a_0$ ,  $R$  e  $\delta$  podem ser ajustados, o que pode requerer alguma correção nos desenhos do projeto arquitetônico.

Após o pré-dimensionamento dos parâmetros iniciais de uma viga celular de eixo curvo, a verificação do dimensionamento segue o mesmo procedimento descrito em 5.11.1 e na Figura 40.

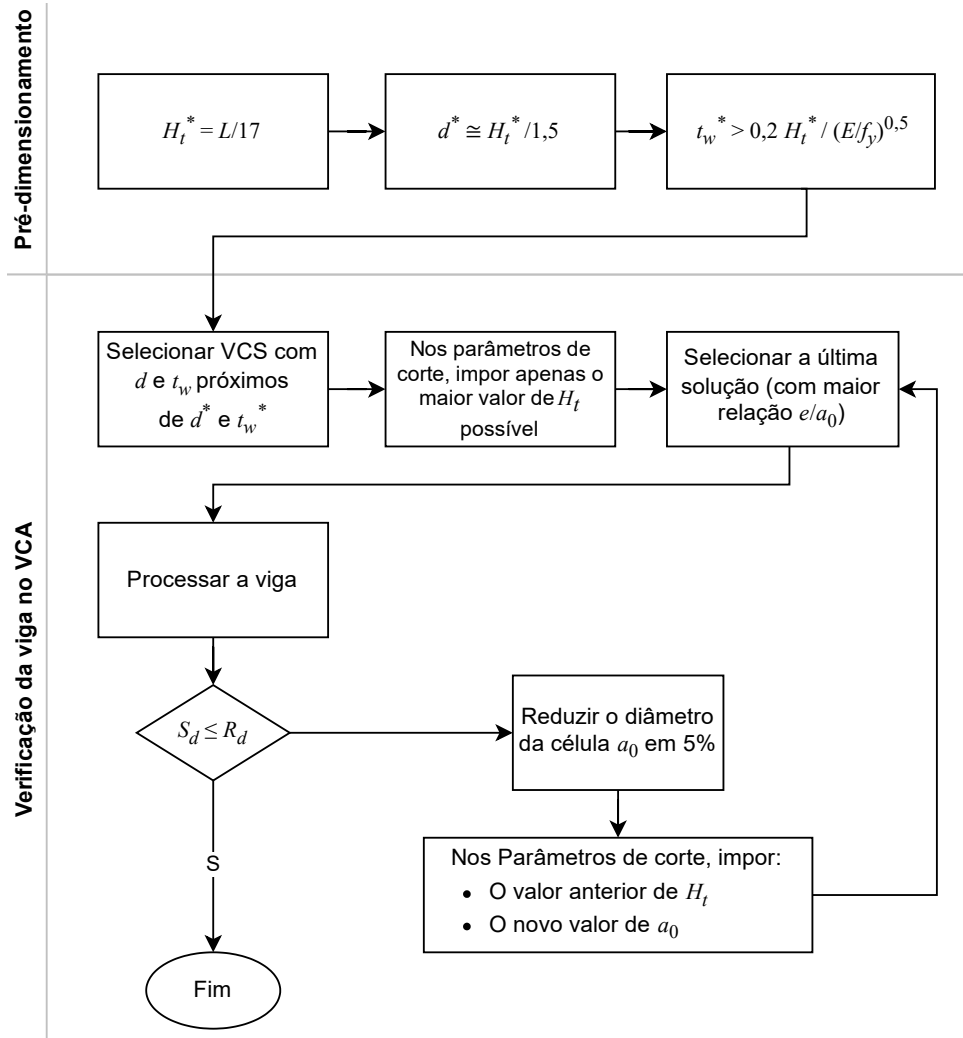


Figura 40 – Fluxograma para pré-dimensionamento e verificação do dimensionamento de vigas celulares de eixo reto no VCA+.

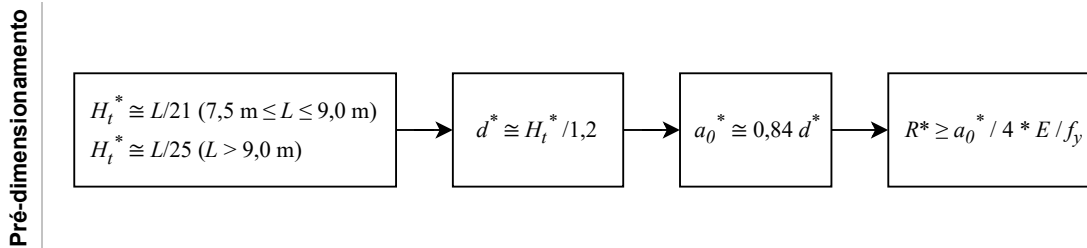


Figura 41 – Fluxograma para pré-dimensionamento de vigas celulares de eixo curvo no VCA+.

### 5.12 Diretrizes para solucionar problemas de dimensionamento

O VCA+ lista no relatório as seguintes taxas, que estão relacionadas aos diversos modos de falha possíveis numa viga celular:

$\Gamma_{M,max}$	resistência ao momento fletor na abertura crítica
$\Gamma_{N,max}$	resistência à força normal na abertura crítica
$\Gamma_{V,max}$	resistência à força cortante na abertura crítica
$\Gamma_{MN,max}$	resistência à interação M+N na abertura crítica
$\Gamma_{NV,max}$	resistência à interação N+V na abertura crítica
$\Gamma_{MV,max}$	resistência à interação M+V na abertura crítica
$\Gamma_{MNV,max}$	resistência à interação M+N+V na abertura crítica
$\Gamma_{Vbw,max}$	verificação à flambagem da alma por cisalhamento no montante crítico
$\Gamma_{Vh,max}$	resistência ao cisalhamento no montante crítico
$\Gamma_{b,max}$	resistência à flambagem do montante crítico
$\Gamma_{Mg,max}$	resistência à flexão do montante crítico
$\Gamma_{Vg,max}$	resistência ao cisalhamento no montante extremo
$\Gamma_{LT,max}$	resistência à flambagem lateral com torção

Na Tabela 3 são sugeridas diretrizes para uma possível redução de peso do perfil original.

Tabela 3 – Diretrizes para reduzir o peso do perfil original para vigas celulares.

Problema	Solução	Efeito colateral
Perfil I original pesado	aumentar a relação $d/b_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{MN,max}</math></li> </ul>
	reduzir o diâmetro $a_0$ das aberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> </ul>
	aumentar a razão de expansão $k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não há efeito colateral para <math>1,2 \leq k \leq 1,5</math></li> </ul>
	aumentar a relação $b_f/t_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{MN,max}</math></li> </ul>

Na Tabela 4 são sugeridas diretrizes para auxiliar na solução de problemas de dimensionamento de vigas celulares, quando qualquer das taxas supracitadas for superior a 1,0. Essas diretrizes basicamente recomendam modificações nas relações geométricas da seção transversal e nos parâmetros de corte da viga que mais impactam o critério de resistência em causa. Além das diretrizes sugeridas na Tabela 4 são, podem ser tomadas as seguintes medidas alternativas para a solução de problemas de dimensionamento:

- se o problema é na abertura crítica, preencher uma ou mais aberturas na região crítica;
- se o problema é no montante de alma, enrijecer o(s) montante(s) crítico(s).

Tabela 4 – Diretrizes para solução de problemas de dimensionamento de vigas celulares (parte 1/2).

Problema	Solução	Efeito colateral possível
$\Gamma_{M,max} > 1$	reduzir a relação $b_r/t_r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> </ul>
	reduzir a relação $h/t_w$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> </ul>
	reduzir o diâmetro $a_0$ das aberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> </ul>
	aumentar a relação $d/b_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{MN,max}</math></li> </ul>
$\Gamma_{N,max} > 1$	reduzir a relação $d/b_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> </ul>
	aumentar o diâmetro $a_0$ das aberturas (* isso diminui a esbeltez da alma do T	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{b,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> </ul>
	reduzir a relação $b_r/t_r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> </ul>
	aumentar a razão de expansão $k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• não há efeito colateral para <math>1,2 \leq k \leq 1,5</math></li> </ul>
$\Gamma_{V,max} > 1$	reduzir a relação $d/b_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> </ul>
	aumentar a razão de expansão $k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• não há efeito colateral para <math>1,2 \leq k \leq 1,5</math></li> </ul>
	reduzir o diâmetro $a_0$ das aberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> </ul>
	aumentar a relação $b_r/t_r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{MN,max}</math></li> </ul>

Tabela 4 – Diretrizes para solução de problemas de dimensionamento de vigas celulares (parte 2/2).

Problema	Solução	Efeito colateral possível
$\Gamma_{MN,max} > 1$	reduzir a relação $d/b_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> </ul>
	reduzir a relação $b_f/t_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• possível aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> </ul>
	reduzir a relação $h/t_w$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> </ul>
	reduzir o passo ( $e/a_0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{b,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{Vh,max}</math></li> </ul>
$\Gamma_{Vh,max} > 1$	aumentar o passo ( $e/a_0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{MN,max}</math></li> </ul>
	aumentar o diâmetro $a_0$ das aberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{b,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{M,max}</math></li> </ul>
	reduzir a relação $h/t_w$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> </ul>
	aumentar a razão de expansão $k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• não há efeito colateral para <math>1,2 \leq k \leq 1,5</math></li> </ul>
$\Gamma_{b,max} > 1$	aumentar o passo ( $e/a_0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{MN,max}</math></li> </ul>
	reduzir o diâmetro $a_0$ das aberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> </ul>
	reduzir a relação $h/t_w$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> </ul>
	reduzir a razão de expansão $k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento do consumo de aço</li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{N,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{V,max}</math></li> <li>• aumento da taxa <math>\Gamma_{Vh,max}</math></li> </ul>

### Agradecimentos

Os autores agradecem à ArcelorMittal Brasil, à CAPES, à FAPEMIG e à UFV pelo apoio para a realização deste trabalho.

### REFERÊNCIAS

[1] ABNT (2025): NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[2] ABNT (2013): NBR 14323 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[3] ArcelorMittal Europe. ACB® Vigas Alveolares. Long Carbon Europe – Sections and Merchant Bars. 2018.

[4] ArcelorMittal Europe - Long products - Sections and Merchant Bars. 2020.

- [5] CMC Steel Products. Disponível em: <http://www.cmcsteelproducts.com> acessado em 30/04/2012.
- [6] EN 1993-1-2:2005. Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design. European Committee for Standardization.
- [7] EN 1994-1-2:2005. Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. European Committee for Standardization.
- [8] Fakury, R.H.; Castro e Silva, A.L.R.; Caldas, R.B. Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. Pearson Education do Brasil, 2016.
- [9] Fares, S.S.; Coulson, J.; Dinehart, D.W. *Castellated and Cellular Beam Desing*. Steel Design Guide #31. American Institute of Steel Construction, 2016.
- [10] Faria, C.C. *Procedimentos para a determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas celulares de aço*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFMG. Belo Horizonte, 2019.
- [11] Feldmann, M.; Heinemeyer, C.; Lukić, M.; Caetano, E.; Cunha, Á.; Goldack, A.; Keil, A.; Schlaich, M.; Hicks, S.; Smith, A.; Hechler, O.; Obiala, R.; Galanti, F.; Waarts, P. (2010). Human-induced Vibration of Steel Structures (HiVoSS): Design Guideline and Background Report. EUR 24183 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. ISBN: 978-92-79-14146-1. DOI: 10.2777/79056.
- [12] Ferreira, F.P.V.; Martins, C.H.; De Nardin, S. Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 172, 2020.
- [13] Grilo, L.F. *Formulação para determinação da força cortante resistente de flambagem do montante de alma em vigas celulares de aço*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFMG. Belo Horizonte, 2018.
- [14] Hechler, O.; Müller, C.; Sedlacek, G. Investigations on beams with multiple regular web openings, Architectural Engineering Conference. USA. 2006.
- [15] Justino, L.G. *Análise da flambagem do montante de alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2018.
- [16] Kerdal, D.; Nethercot, D. A. *Failure modes for castellated beams*. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 4, p. 295-315, 1984.
- [17] Martin, P.O.; Galéa, Y.; Bitar, D.; Demarco, T. Poutres cellulaires acier et mixtes - Partie 2 : proposition d'un modèle pour le calcul des flèches. *Revue Construction Métallique* n°2-2006. CTICM.
- [18] Oliveira, L.B. *Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura*. Dissertação de Mestrado, UFV. Viçosa, 2012.

[19] Pereira, C.L. Estudo comparativo de soluções para sistemas de piso misto de aço e concreto, com vigas mistas de alma cheia e vigas mistas alveolares. Trabalho Final de Curso. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 2019.

[20] Pereira, C.L. Simulação computacional do comportamento estrutural de vigas celulares mistas de aço e concreto com perfil monossimétrico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2022.

[21] prEN 1993-1-13 – Steel beams with large web openings – Working draft 12th November 2018.

[22] prEN 1994-1-1 - Annex Composite Beams with large web openings – Working draft delivered by SC4-PT 2 on 11th December 2017.

[23] Sakiyama, E.K. Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma por cisalhamento em vigas casteladas soldadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

[24] Silva, C.C. *Momento fletor resistente à flambagem lateral com distorção de vigas casteladas mistas de aço e concreto*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFMG. Belo Horizonte, 2018.

[25] Valente, M.T. *Análise numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço em situação de incêndio com ênfase nos modos de falha por plastificação*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

[26] VCA Plus. Software para cálculo de vigas celulares. ArcelorMittal Brasil, 2025.

[27] Teixeira, F.B. *Análise numérica de perfis alveolares de aço*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFMG. Belo Horizonte, 2017.