



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 ¹

Felipe Isamu Harger Sakiyama ²

Luis Augusto Lancellotti Zapparolli Pupin ³

Raylane de Souza Castoldi ⁴

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 been 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.

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

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

³ Engenheiro Mecânico, Especialista, Engenheiro de P&D, ArcelorMittal Brasil, São Paulo, SP, Brasil.

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

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresenta-se uma visão abrangente sobre as **vigas celulares de aço**, abordando sua origem, fabricação, vantagens, aplicações e comportamento estrutural, com ênfase na ferramenta computacional VCA+, desenvolvida para auxiliar seu projeto e dimensionamento conforme as normas brasileiras.

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 [1].

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 [3].

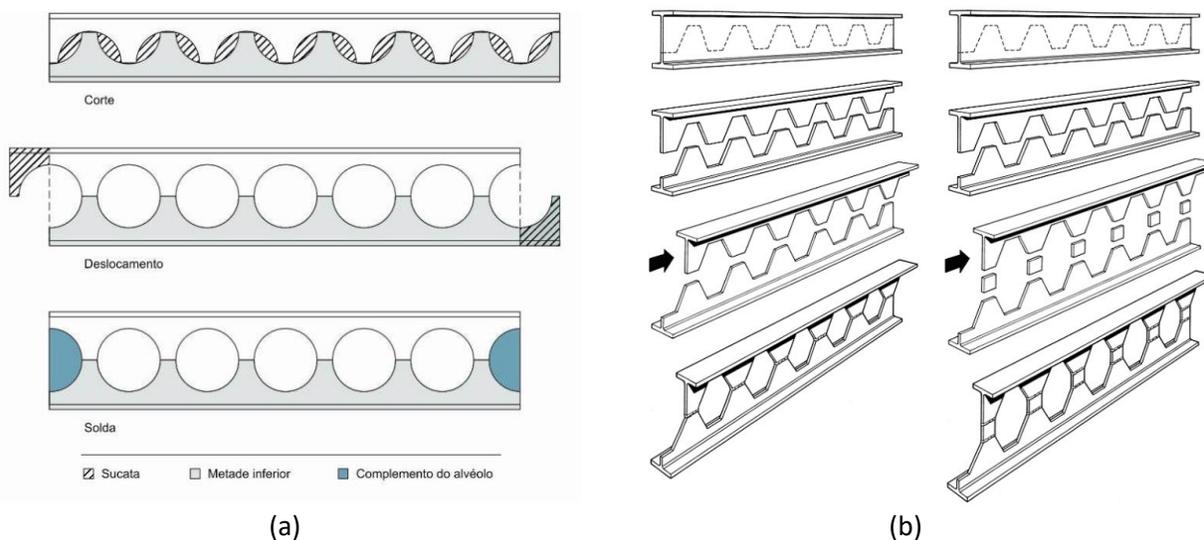


Figura 1 – Representação esquemática da fabricação a partir do corte de um perfil I laminado (a) viga celular; (b) viga castelada (adaptado de GRÜNBAUER, 2012 [2]).

1.2 Nomenclatura

Os principais elementos geométricos de uma viga celular são identificados na Figura 2. 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 2, 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).

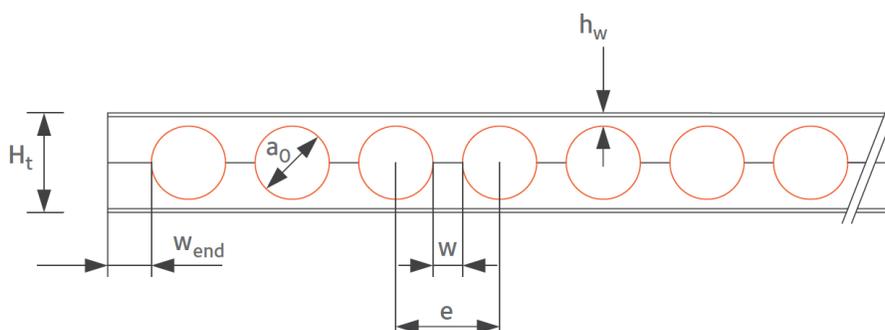


Figura 2 – Elementos geométricos de uma viga celular.
(fonte: ArcelorMittal Europa, 2018 [6])

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 3). 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 3 – Corte na alma para produção das metades de uma viga celular.
(foto: ArcelorMittal Europa)

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.

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 4).

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 (δ) 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.

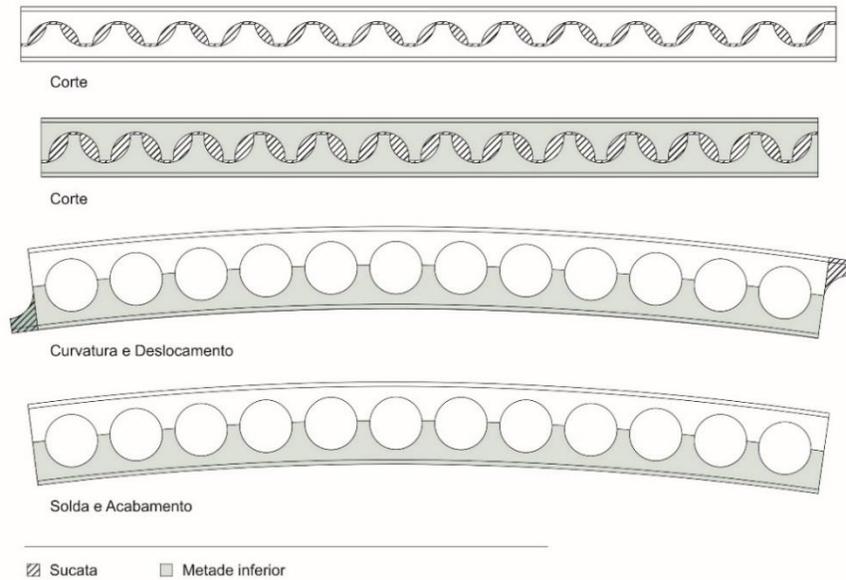


Figura 4 – Viga celular com eixo curvo.

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 5. Essa configuração é interessante para estruturas com grande momento fletor em uma das extremidades, como coberturas em balanço e coberturas de galpões.

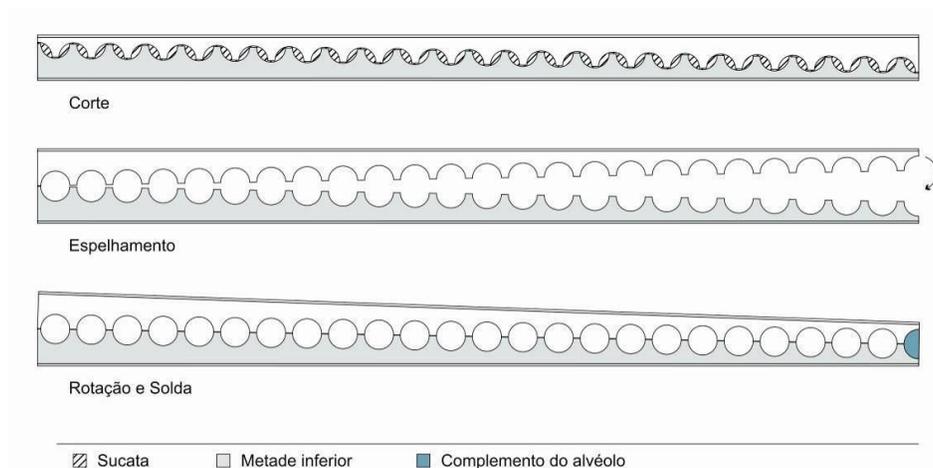


Figura 5 – Viga celular de inércia variável.

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 próxima 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 6.

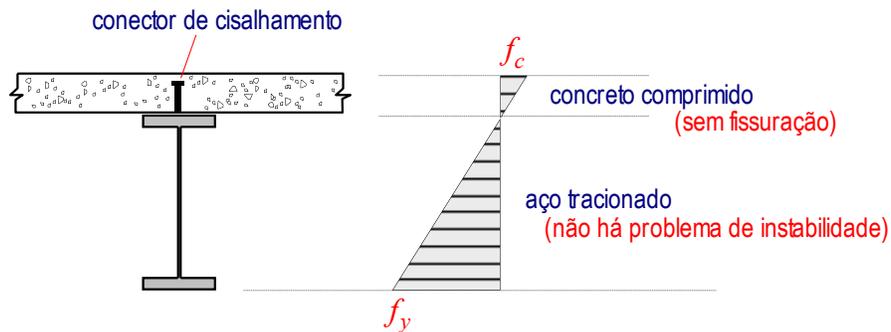


Figura 6 – Distribuição de tensões normais de flexão em regime elástico na laje de concreto e na viga de aço quando ambas trabalham solidárias na viga mista.

Na configuração da Figura 6, 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 (Figura 7), com uma seção mais leve no banzo superior, reduzindo-se o consumo de aço sem prejuízo do desempenho estrutural.

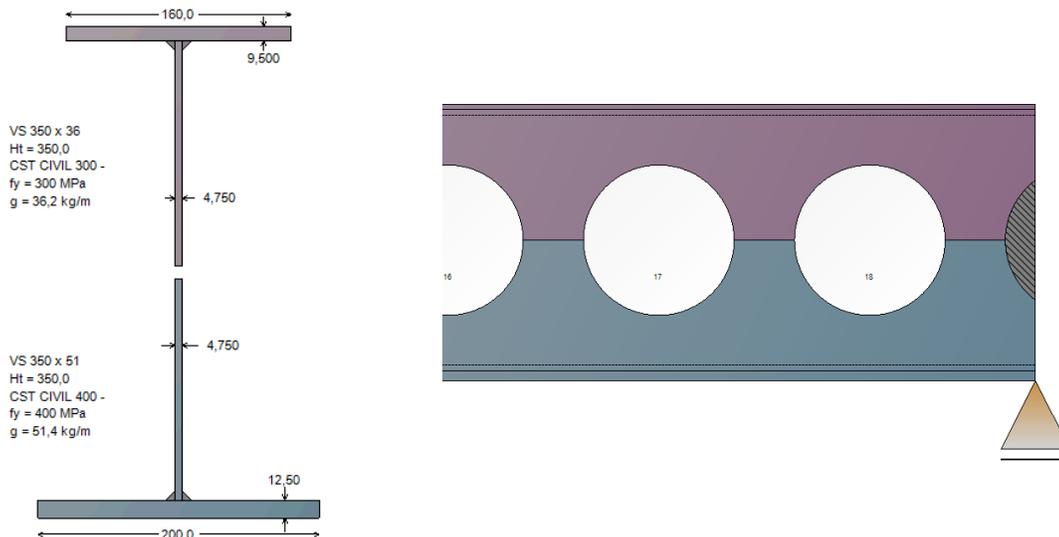


Figura 7 – Exemplo de uma seção monossimétrica híbrida para uma viga celular.

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. 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 [4].

Uma viga celular também pode ser fabricada como um perfil soldado [5]. 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 8);
- 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 9);
- cortar um perfil I soldado, como mostrado nas Figuras 2 e 4.



Figura 8 – Corte e montagem de uma viga celular soldada.
(fotos: Hermano Cardoso)



Figura 9 – 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 9, 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 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 explorarem 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.

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)

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.

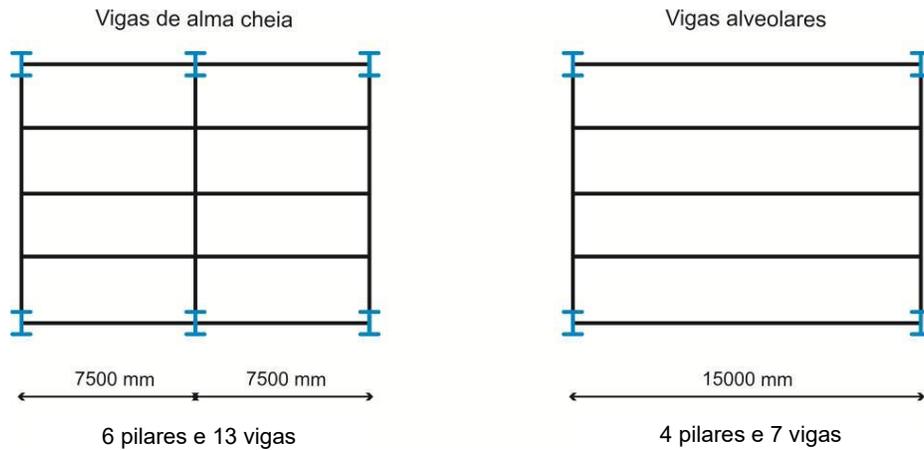


Figura 11 – Comparação entre pavimentos com viga de alma cheia e com viga celular.

Utilizando como base a comparação formulada pela CMC Steel (2012) [7], 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.

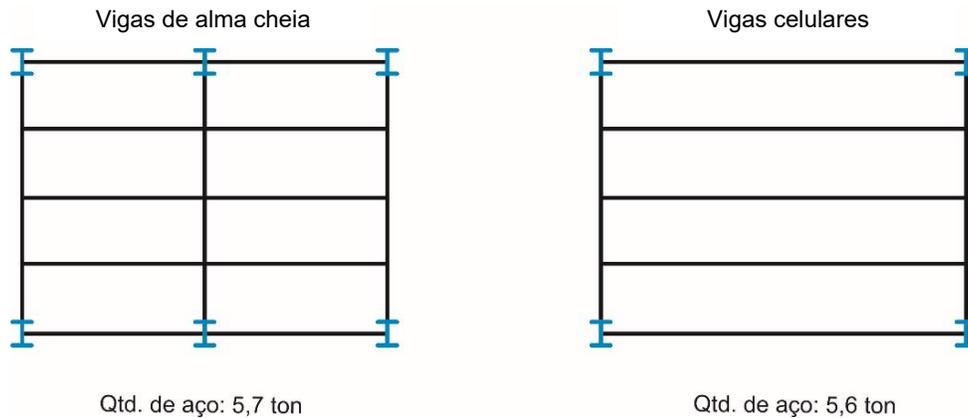


Figura 12 – Comparação do consumo de aço entre pavimentos com vigas de alma cheia e com vigas celulares.

1.5 APLICAÇÕES DE VIGAS CELULARES

1.5.1 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 [3].

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.

Um outro fator que influencia na escolha das vigas celulares é 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 [3].

1.5.2 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)

1.5.3 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 – 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 – 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).

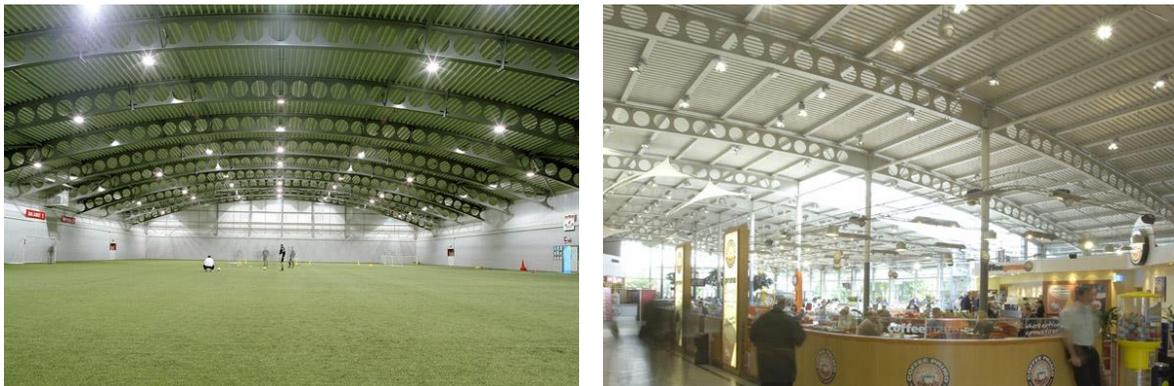


Figura 16 – Academia Liverpool FC (44 m) e South Mimms Services - Reino Unido.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)

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 – acessado em 11/05/2011)

1.5.4 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 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.

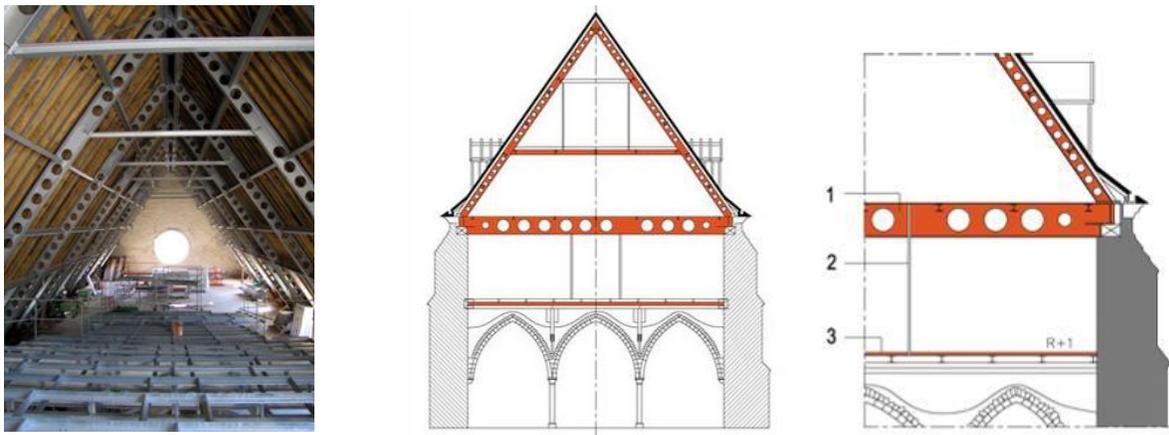


Figura 18 – Elevação do edifício principal e detalhes do apoio da nova estrutura.
(fonte: www.constructalia.com – acessado em 13/12/2011)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a investigação do comportamento estrutural de vigas celulares são utilizadas análises experimentais (ensaios de modelos em laboratório), simulações computacionais e análises teóricas, eventualmente apoiadas por análises estatísticas.

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 [8, 9, 10, 11, 12]. Por essa razão, os modos de falha de uma viga celular diferem daqueles observados nos perfis de alma cheia [13, 14, 15, 16, 17, 18].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição de esforços e tensões nas vigas celulares

As vigas de aço em pisos de edifícios costumam ter ligações flexíveis nas extremidades por serem mais simples de fabricar e montar, além de garantirem que a viga trabalhe apenas com momento positivo — o que favorece sistemas mistos, permitindo que a laje resista à compressão. Em vigas biapoiadas com carga distribuída, o momento fletor é máximo no centro do vão e nulo nos apoios, onde a força cortante atinge seu valor máximo (Figura 19).

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.

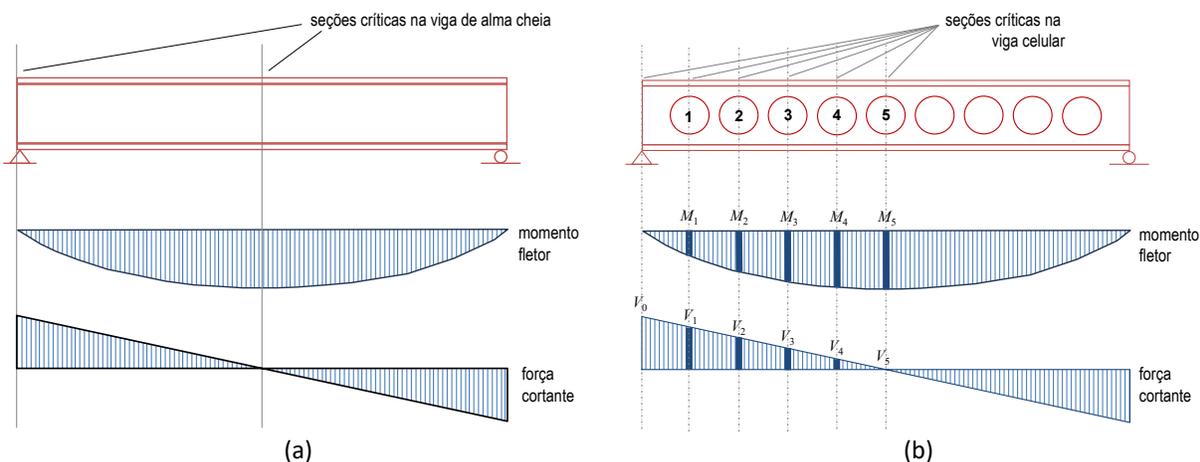


Figura 19 – Seções críticas em uma viga de alma cheia e em uma viga celular.

3.2 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 [8]:

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 [19]:

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.

Existem diversas propostas de modelos e metodologias para verificação da capacidade resistente de vigas celulares 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.

3.3 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).

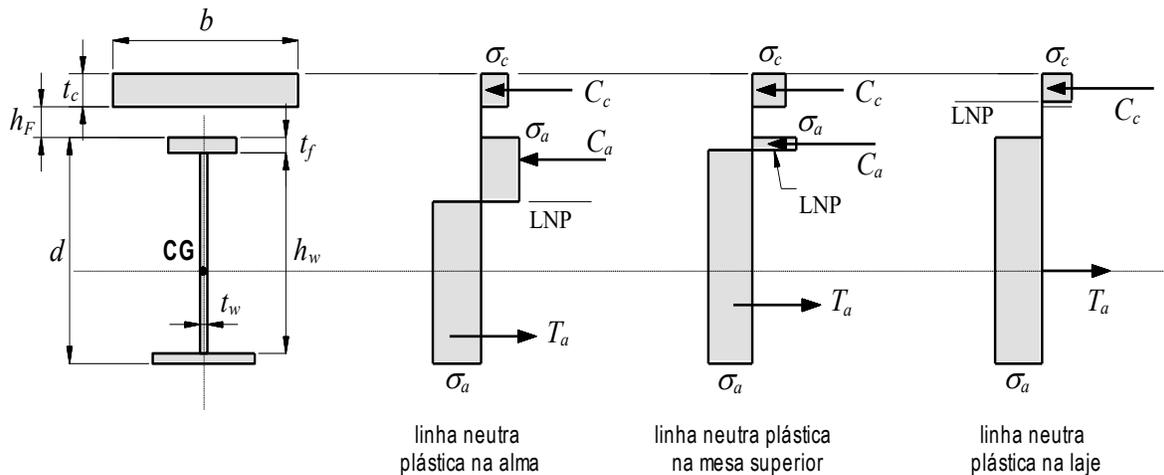


Figura 20 – Distribuição de tensões e resultantes de forças em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo, com a LNP situada na alma, na mesa e na laje.

Na Figura 20: σ_a = tensão no aço; σ_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.

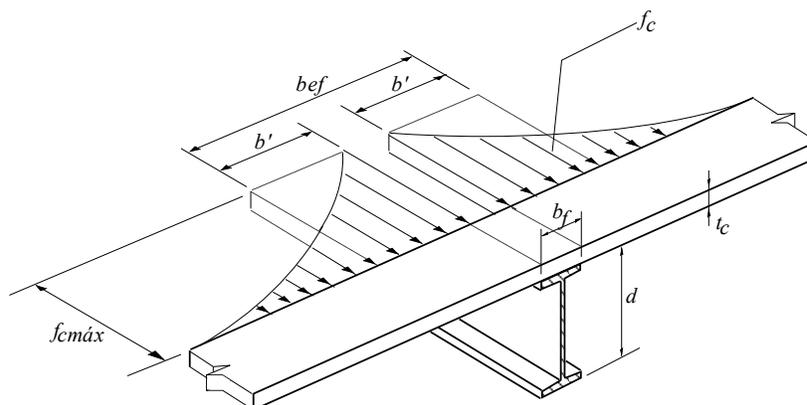


Figura 21 – Distribuição da tensão f_c e largura efetiva b_{ef} .

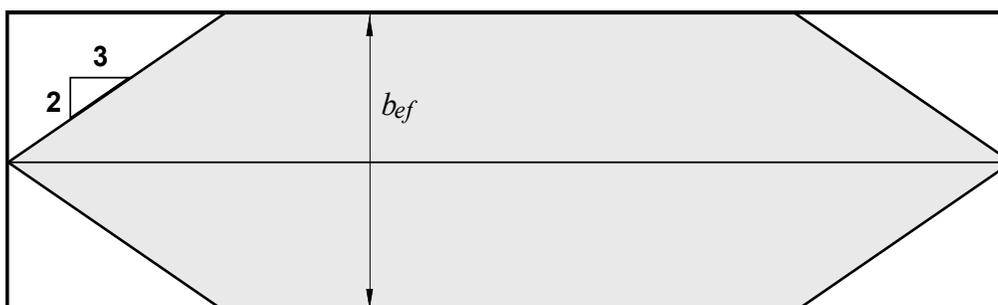


Figura 22 – Variação da largura efetiva da laje ao longo de uma viga mista.

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 esbelteza 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 esbelteza 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.

3.4 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 tê — 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).

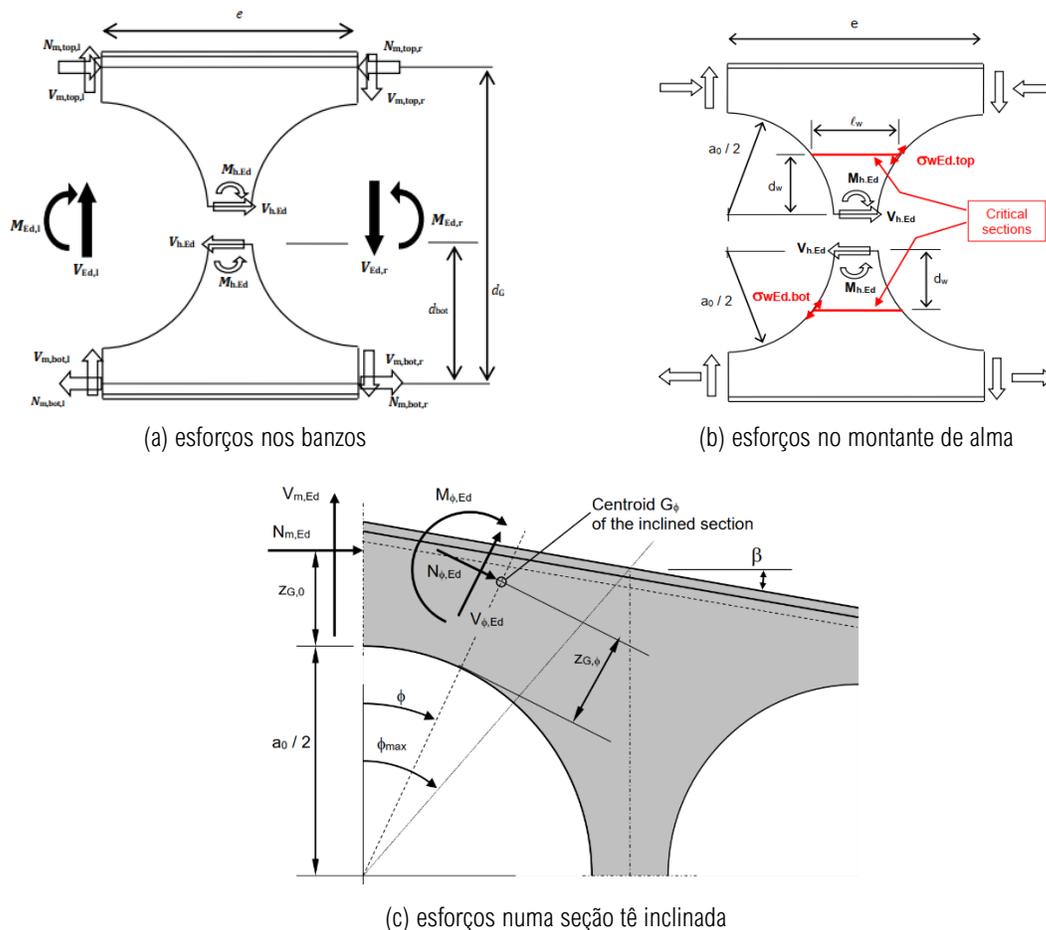


Figura 23 - Esforços internos em uma viga celular.

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

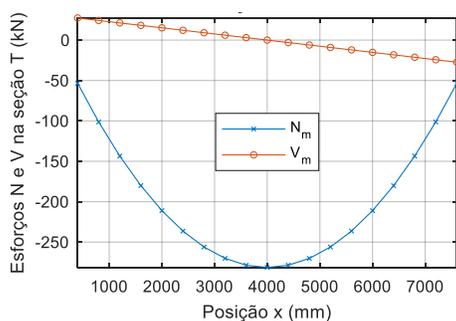
$$e_V = \left(\frac{a_0}{2} + z_{G,0} \right) \sin(\phi) \quad \text{braço de alavanca de } V_m \quad (5)$$

Nota-se que o momento resultante M_ϕ 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_ϕ 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.

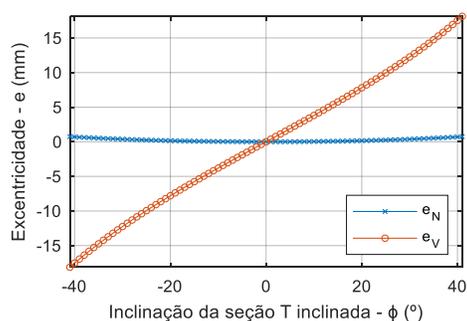
Na Figura 24.c e na Figura 24.d são mostradas as componentes $M_{\phi,N}$ e $M_{\phi,V}$ e o momento solicitante total $M_{\phi,Sd}$ nas seções inclinadas na primeira abertura próxima ao apoio e na abertura no centro do vão, respectivamente, para uma determinada viga celular. Verifica-se que o momento $M_{\phi,Sd}$ 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.

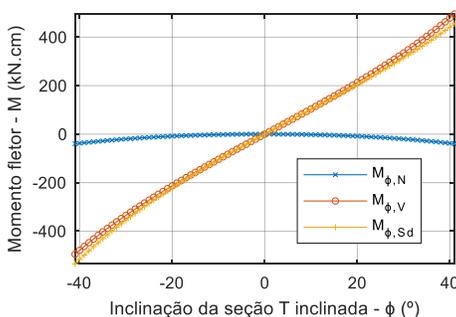
O dimensionamento à flexão de uma viga celular em perfil I soldado envolve: (1) a verificação da flexão em perfis T monossimétricos, com a mesa superior comprimida; e (2) a verificação da estabilidade do montante de alma. A capacidade resistente depende das propriedades geométricas do perfil original, 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.



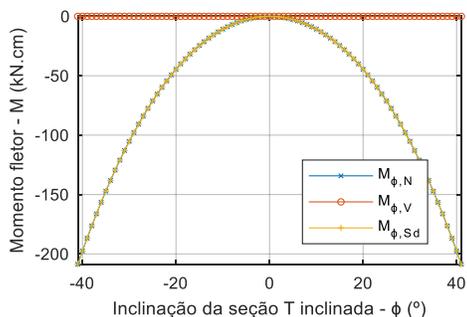
(a) Esforços internos na seção tê.



(b) Excentricidades nas seções tê inclinadas.



(c) Esforços nas seções inclinadas na primeira abertura.



(d) Esforços nas seções inclinadas na abertura central.

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.

3.5 Critérios para projeto de vigas celulares e detalhes construtivos

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.

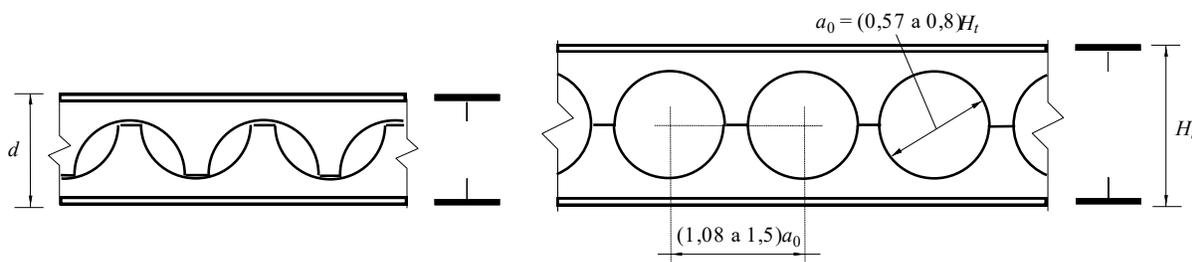


Figura 25 – Corte das vigas celulares e faixas de variação do passo e do diâmetro das aberturas.

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.

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).

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.

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 – acessado em 13/12/2011).

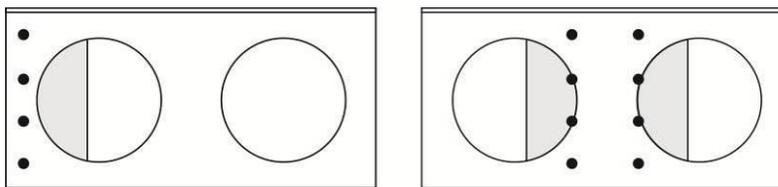


Figura 27 – Fechamento parcial das aberturas.

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).

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 mostrado na Figura 27, 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).

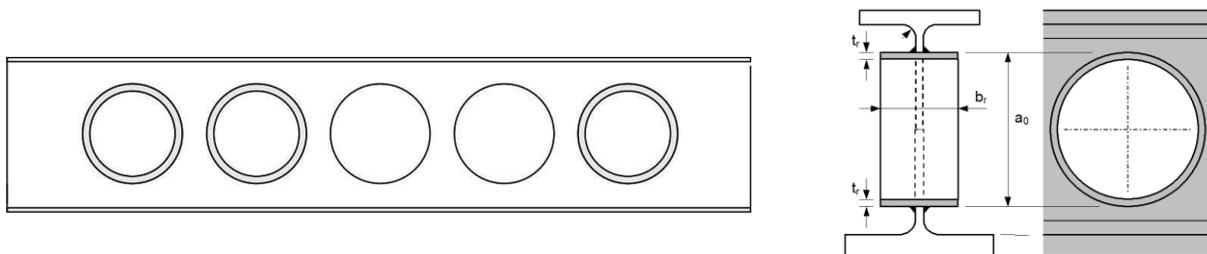


Figura 28 – Reforço com enrijecedor de anel soldado na borda da abertura.

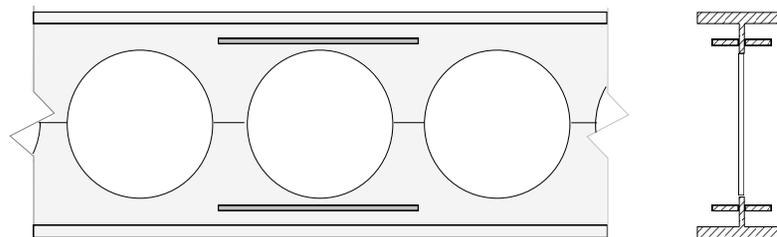


Figura 29 – Enrijecedores horizontais de alma acima e abaixo de uma abertura.

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 [3].

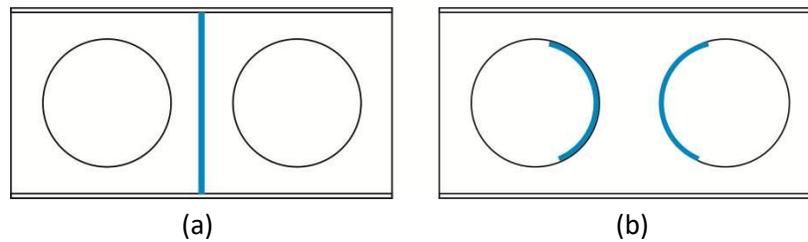


Figura 30 – Enrijecedores no montante e nas aberturas.

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):

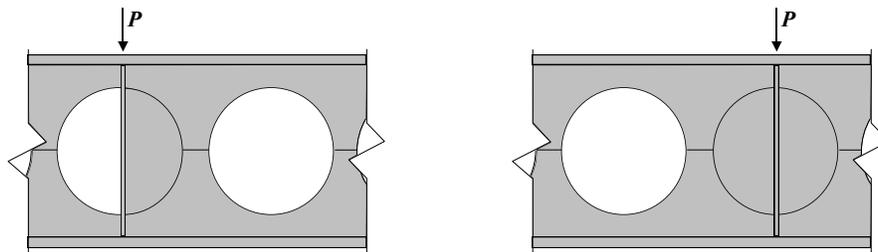


Figura 31 – Enrijecedores de alma sob força concentrada atuando sobre uma abertura.

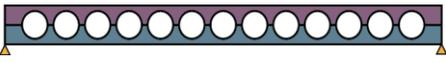
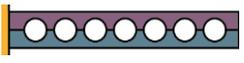
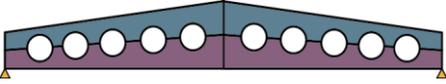
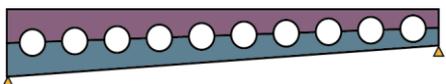
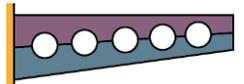
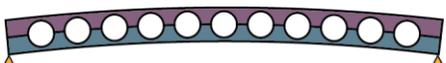
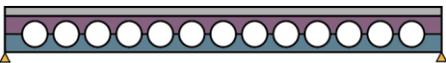
3.6 Cálculo de vigas celulares com o VCA+

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 na Figura 8.

3.6.1 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

3.6.2 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).

3.6.3 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.

Coef. de ponderação das ações

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

Fatores de combinação
 Fator padrão aplicado às ações variáveis

ψ_0 0,70
 ψ_1 0,60
 ψ_2 0,40

Coeficientes de resistência

	Aço	Laje	Incêndio
γ_{a1}	1,100	γ_c 1,400	$\gamma_{M,fi}$ 1,000
γ_{a2}	1,350	γ_{cs} 1,250	$\gamma_{c,fi}$ 1,000
		γ_{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 permaneçam 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.

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

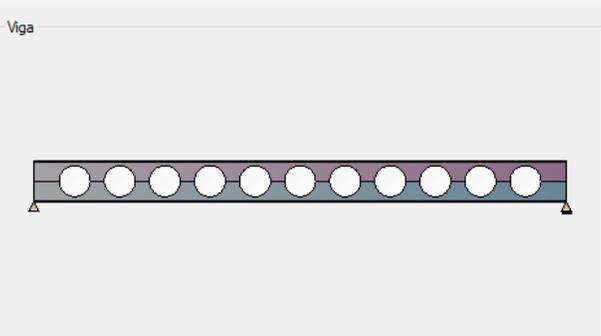


Figura 33 – Janela de configuração dos parâmetros gerais da viga.

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.

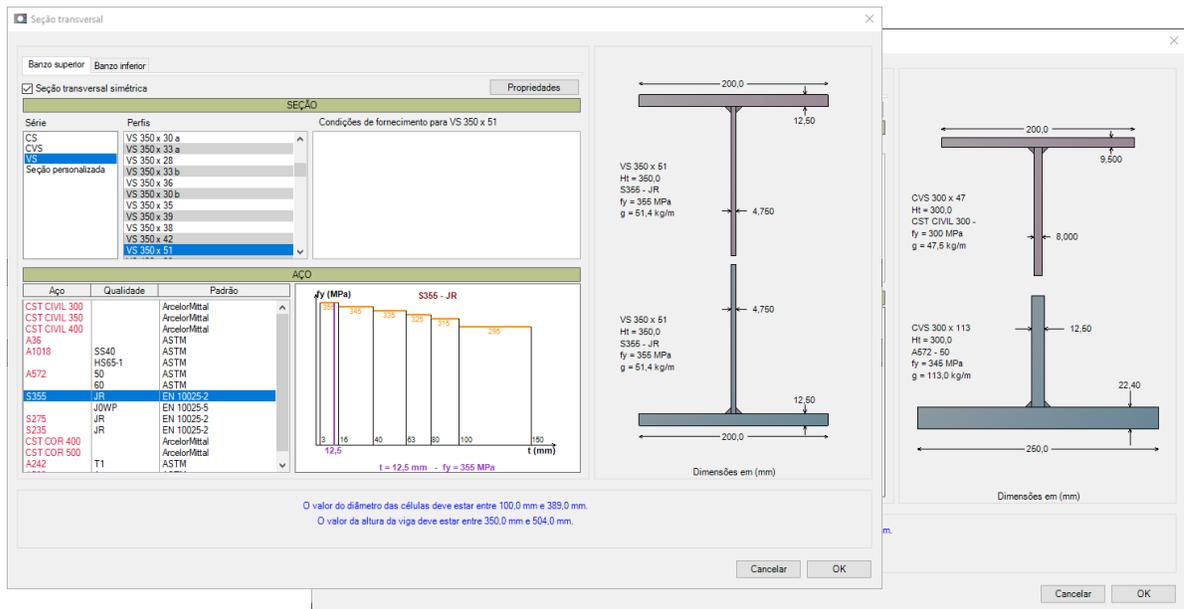


Figura 34 – Janela para configuração da seção transversal da viga.

3.6.4 Viga celular mista

Quando o usuário seleciona “viga mista” na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 35), o programa mostra a 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.

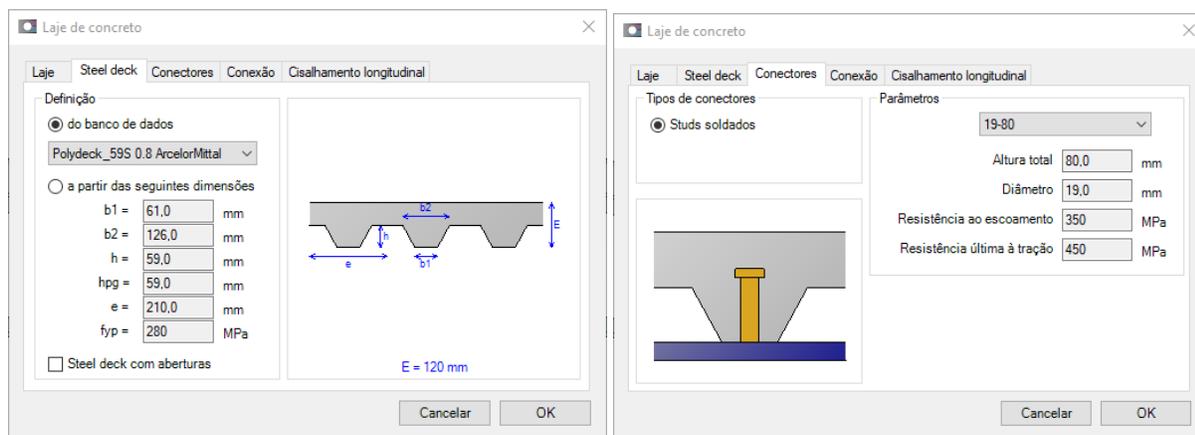


Figura 36 – Janela para configuração dos parâmetros da laje, no caso de viga celular mista.

3.6.5 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.

3.6.6 Viga celular curva

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

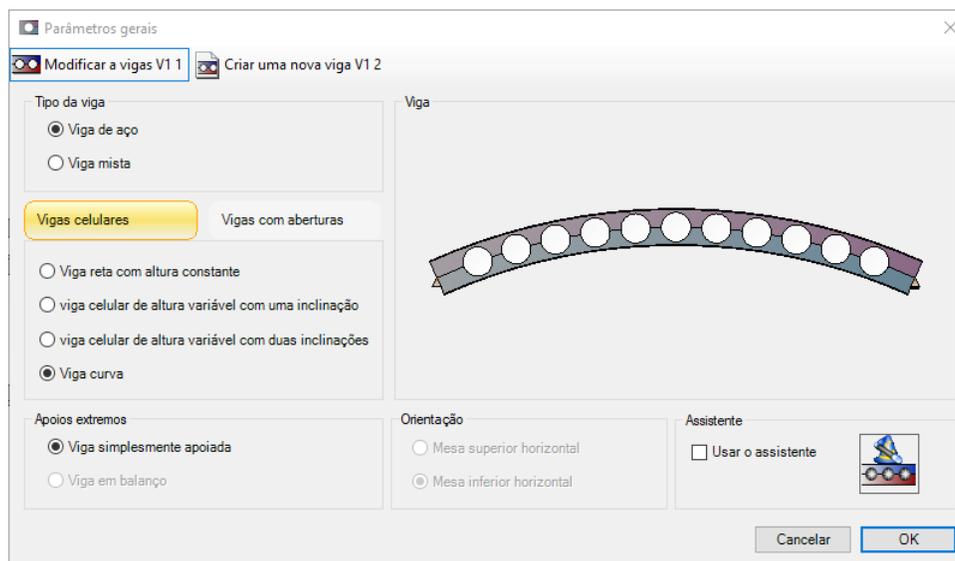


Figura 37 – Seleção de viga celular curva na janela de parâmetros gerais da viga.

3.6.7 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.

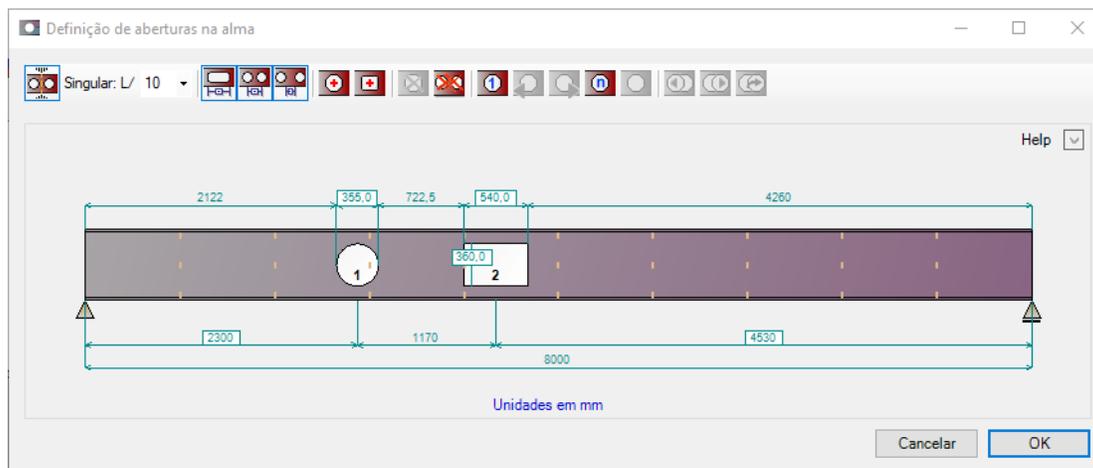


Figura 38 – Janela para definição de aberturas especiais na alma da viga.

3.6.8 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 [20] 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) [21] ou no anexo da prEN 1994-1-1 (2017) [22]. Um modelo de cálculo específico é considerado para as flechas [23].

3.6.9 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 8800:2024 [24] e da ABNT NBR 14323:2013 [25]. No Relatório de Projeto, os critérios de resistência são apresentados como

uma taxa Γ 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:

$$\Gamma_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \tag{6}$$

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).

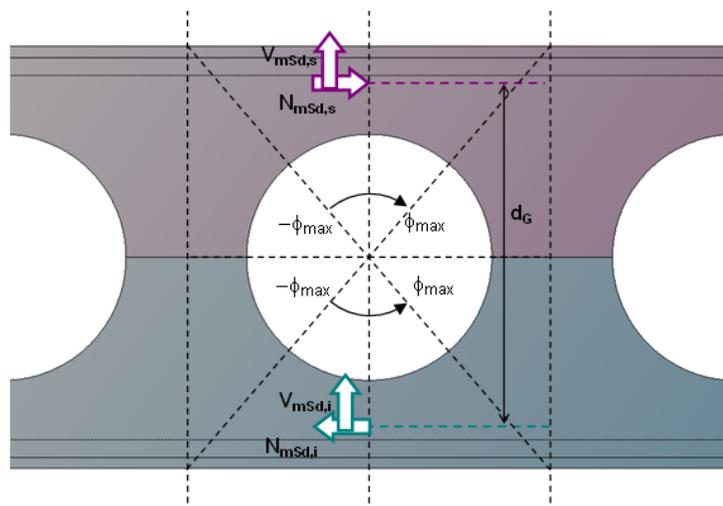


Figura 39 – Forças axiais e forças cortantes nos tês no centro de uma abertura.

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 ϕ), 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: $\Gamma_{MNV} \leq 1,0$

3.6.10 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.

3.6.11 Pré-dimensionamento e verificação do dimensionamento no VCA+

3.6.11.1 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 (série especial para **Viga Celular Soldada**):

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.

3.6.11.2 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: $R^* = \frac{a_0^* E_a}{4 f_y} \quad (13)$

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 δ 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 3.6.11.1 e na Figura 40.

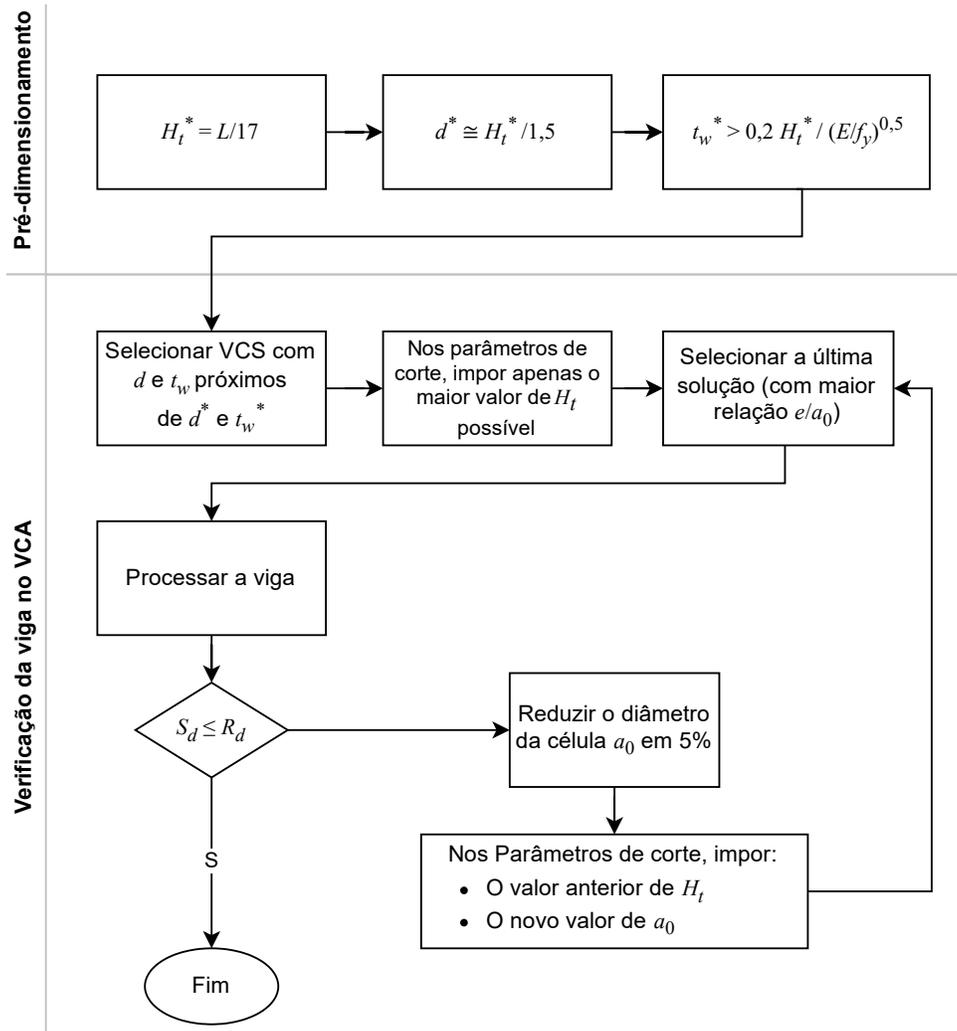


Figura 40 – Fluxograma para pré-dimensionamento e verificação do dimensionamento de vigas celulares de eixo reto no VCA+.

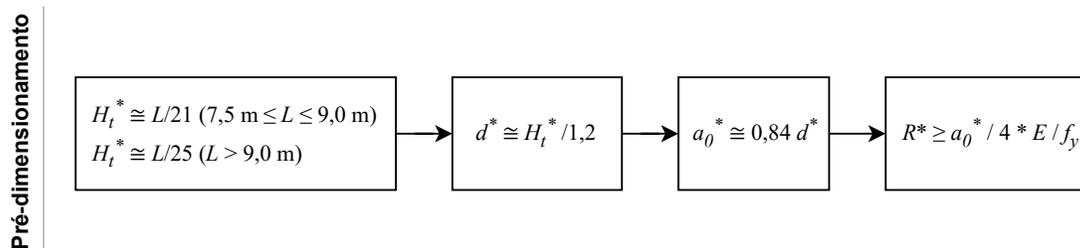


Figura 41 – Fluxograma para pré-dimensionamento de vigas celulares de eixo curvo no VCA+.

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

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

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

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

3.6.13 Exemplo de dimensionamento de uma viga celular mista com o software VCA+

Neste exemplo é apresentado o dimensionamento de uma viga celular mista de eixo reto e altura constante para um sistema de piso.

Parâmetros gerais:

vão horizontal da viga:	15 m
comprimento destravado:	0 m
apoios de extremidade:	viga simplesmente apoiada
tipo de viga:	intermediária
sistema de piso:	4 apoios
perfil base:	VS 600x111
aço:	ASTM A572 Gr.50
espessura total da laje:	120 mm
steel deck:	Polydeck 59S (0,8 mm)
concreto:	C25
conector de cisalhamento:	CISER 19-105 (diâmetro 19 mm; altura 105 mm)

Corte da viga:

número de células (n):	18
diâmetro das células (a_0):	650 mm
espaçamento das células (e):	800 mm

Casos de carga:

Ações permanentes (G):

- carga permanente	6,37 kN/m	(peso próprio calculado automaticamente)
- carga de superfície	1,00 kN/m ²	(aplicada sobre a largura de influência)
Sobrecarga 1 (Q1)	3,00 kN/m ²	(aplicada sobre a largura de influência)
Construção (QC)	1,00 kN/m ²	(aplicada sobre a largura de influência)

Combinações últimas:

Estados-limites últimos:

- construção: $U1 = 1,40 G + 1,30 QC$
- normal: $U2 = 1,40 G + 1,50 Q1$

Estados-limites de serviço:

- $S1 = 1,00 G + 1,00 Q1$ (combinação rara)
- $S5 = 1,00 G + 0,60 Q1$ (combinação quase-permanente com $\psi_2 = 0,6$)

→ Criando a viga no VCA+

Para criar uma viga no VCA+, selecione o menu **Arquivo > Novo**. Alternativamente, clique no botão  na barra de ferramentas principal. Na janela **Parâmetros gerais** (Figura 42), configure as opções da seguinte maneira:

- (1) selecione a aba **Criar uma nova viga**;
- (2) escolha **Viga de mista** para calcular vigas mistas;
- (3) marque **Vigas celulares**;
- (4) selecione a opção **Viga reta com altura constante**;
- (5) defina a vinculação da viga como **Viga simplesmente apoiada**;
- (6) ative a opção **Usar o assistente**.

Para avançar, clique no botão **Próximo** no canto inferior direito.

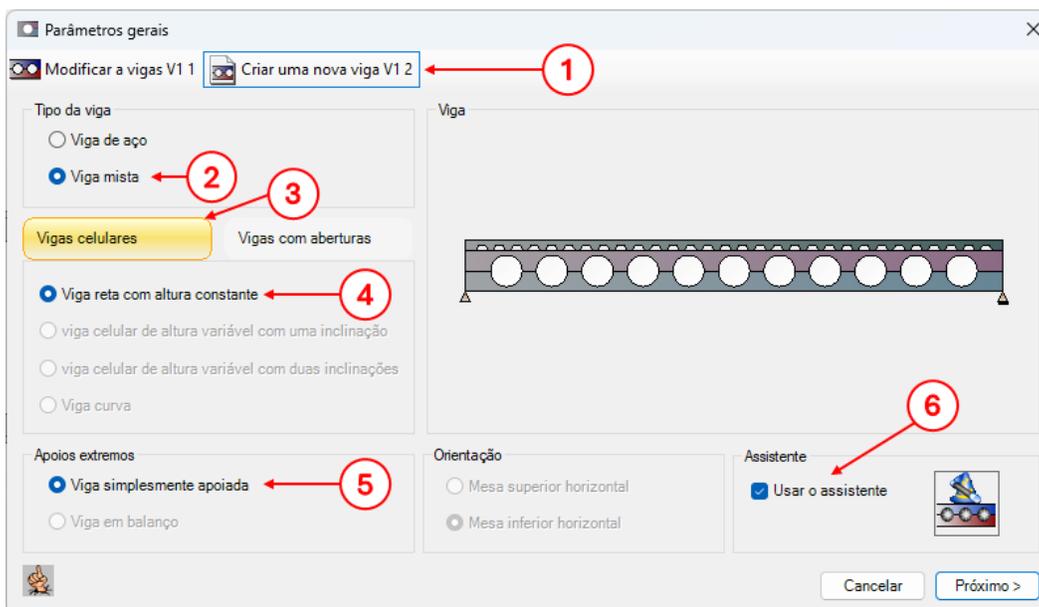


Figura 42 – Configuração da janela Parâmetros gerais.

→ Vão e posição da viga

Na janela **Vão e posição da viga** (Figura 43), informe os seguintes parâmetros da viga:

- (1) vão horizontal da viga: **15 m** ;
- (2) tipo de viga: **Viga intermediária** ;
- (3) distâncias às vigas adjacentes L_1 e L_2 : **2,5 m** .

Para avançar, clique no botão **Próximo** no canto inferior direito.

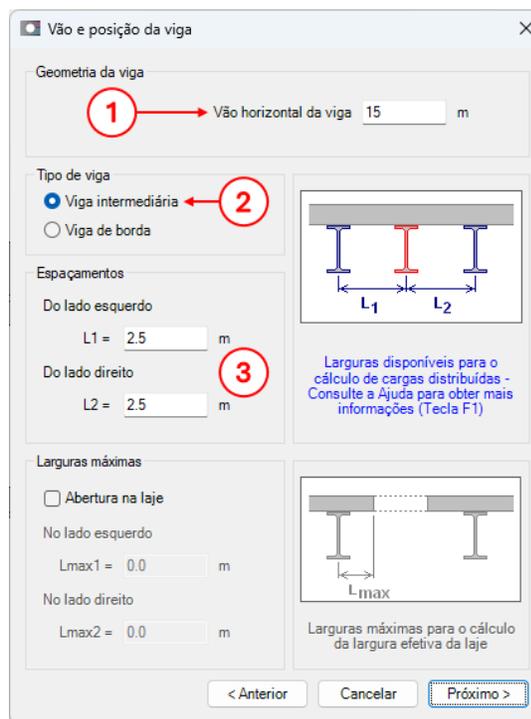


Figura 43 –Vão e posição da viga.

→ Seção transversal

O perfil base e o tipo de aço são configurados na janela **Seção transversal** (Figura 44). Com base nos dados do problema, configure as opções conforme a seguir.

- (1) Marque a caixa de seleção **Seção transversal simétrica**. O perfil escolhido será automaticamente adotado para os banzos superior e inferior.
- (2) Selecione a série **VS**.
- (3) Selecione o perfil base **VS 600x111**.
- (4) Escolha o aço **ASTM A572 Gr. 50**.
- (5) Clique no botão **Propriedades** para visualizar as propriedades detalhadas do perfil.

Para avançar, clique no botão **Próximo** (ou **OK**) no canto inferior direito.

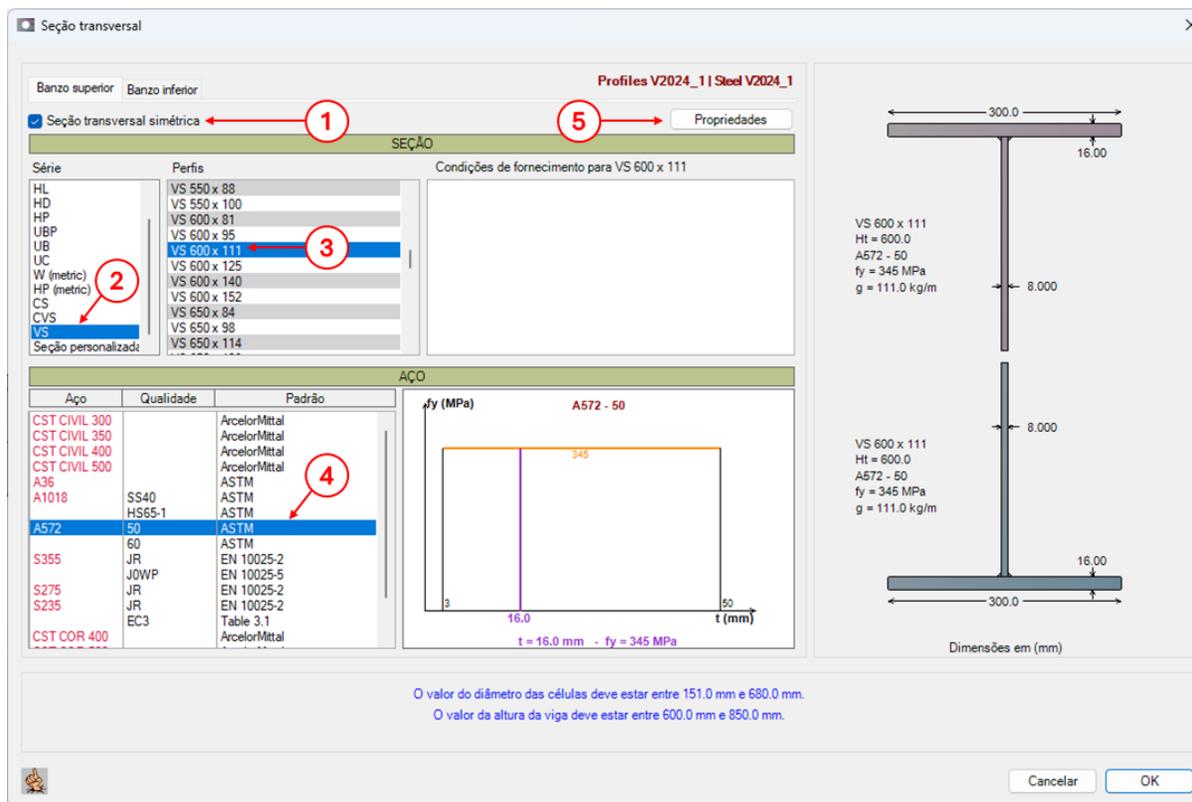


Figura 44 – Dados de entrada na janela Seção transversal.

→ Corte da viga

A configuração do corte da viga celular é realizada na janela **Corte das vigas** (Figura 45). O VCA+ busca automaticamente as soluções de corte possíveis com os parâmetros dados pelo usuário. O usuário deve especificar pelo menos um dos três parâmetros: diâmetro das células (a_0), espaçamento das células (e) ou altura total (H_t). Para encontrar a(s) solução(ões) de corte da viga, siga os seguintes passos.

- (1) Selecione a aba **Projeto da viga**.
- (2) Marque a caixa de seleção **Diâmetro das células** e informe o valor de $a_0 = 650$ mm.
- (3) Marque a caixa de seleção **Espaçamento das células** e informe o valor de $e = 800$ mm.
- (4) Clique no botão **Buscar as soluções**.
- (5) As possíveis soluções são listadas na tabela (neste caso há apenas uma solução possível). Clique sobre a solução para visualizar o croqui do corte na região inferior da janela. Caso não houvesse nenhuma solução viável, seria necessário alterar os parâmetros de corte ou reduzir o número de parâmetros impostos.

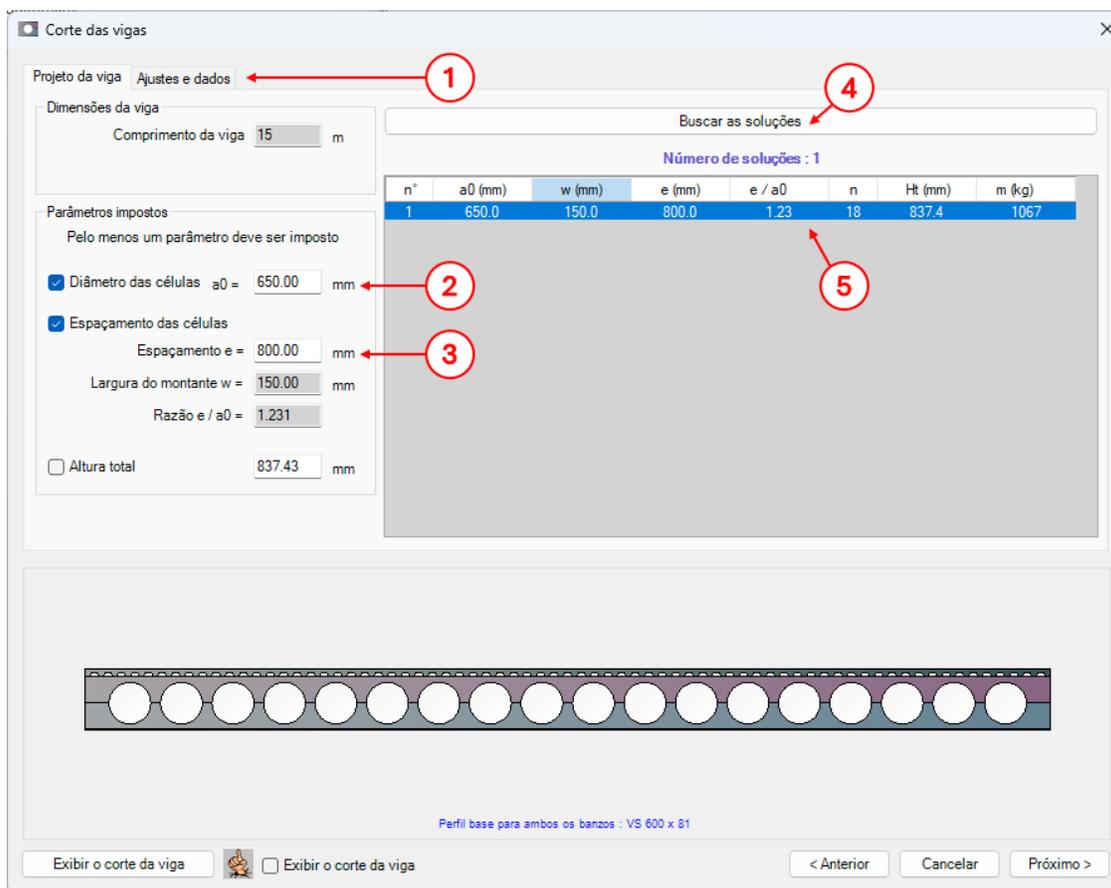


Figura 45 – Dados e opções na janela Corte das vigas.

→ Laje de concreto

A configuração da laje de concreto envolve a definição dos parâmetros da laje, do *steel deck* (no caso de laje com fôrma de aço incorporada), dos conectores de cisalhamento, da disposição dos conectores e da armadura de cisalhamento longitudinal. Todos os parâmetros estão organizados em abas em uma janela única, chamada **Laje de concreto**.

Após ajustar os parâmetros em todas as abas, clique no botão **OK/Próximo** no canto inferior da janela para continuar.

A configuração da laje é feita na aba **Laje** da janela **Laje de concreto** (Figura 46), conforme a seguir.

- (1) Para o tipo de laje, selecione **Laje com fôrma de aço incorporada**.
- (2) A direção das nervuras do deck é **perpendicular à viga**.
- (3) Escolha **Construção não escorada** no painel de Escoramento durante a montagem.
- (4) Em espessura da laje, defina a espessura total da laje **E = 120 mm**.
- (5) Configure as **propriedades do concreto** conforme mostrado na Figura 46.

A imagem mostra a janela de configuração 'Laje de concreto' com as seguintes configurações visíveis:

- Tipo de laje:** Laje com fôrma de aço incorporada (1)
- Direção das nervuras do deck:** perpendicular à viga (2)
- Escoramento durante a montagem:** Construção não escorada (3)
- Esposuras da laje:** Espessura total da laje E = 120.0 mm (4)
- Propriedades do concreto:** Concreto leve (5), Classe C25/30, Densidade 2400 kg/m3, Retração 300 x10-6%

Figura 46 – Configuração da aba Laje de concreto.

Para a correta definição da espessura total da laje, deve-se atentar às limitações da ABNT NBR 8800:2024, prescritas no item L.2.6.1, a saber:

- projeção dos conectores acima do topo da fôrma, depois de instalados, igual ou superior a 40 mm;
- cobertura de concreto acima do topo da fôrma de aço, igual ou superior a 50 mm.

A combinação das duas limitações supracitadas impõe, na prática, um cobertura de concreto de pelo menos 10 mm acima do conector.

Quando o tipo de laje for definido como **Laje com fôrma de aço incorporada**, a aba **Steel deck** é habilitada para edição (Figura 47). O usuário pode escolher uma fôrma de aço de um catálogo do banco de dados, ou informar as dimensões personalizadas da fôrma. Para este exemplo, a seguinte configuração deve ser feita:

- (1) para **Definição** selecione a opção “do banco de dados”;
- (2) selecione a fôrma **Polydeck_59S 0.8 ArcelorMittal**;

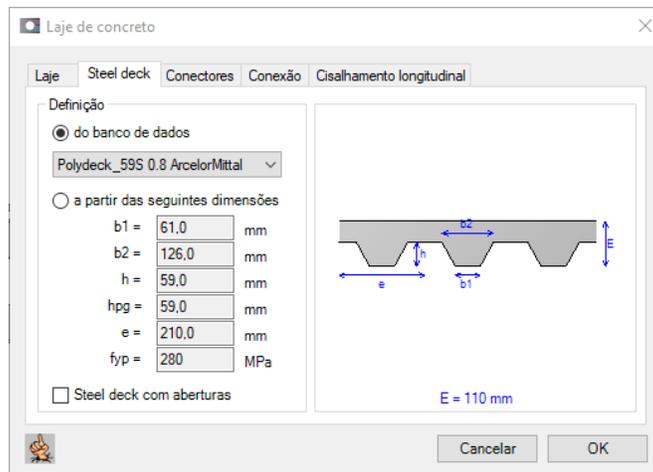


Figura 47 – Configuração da aba Steel deck.

Na versão atual, o VCA+ suporta apenas conectores de cisalhamento do tipo *stud* soldado (Figura 48).

- (1) Selecione o conector **19-105** da base de dados.

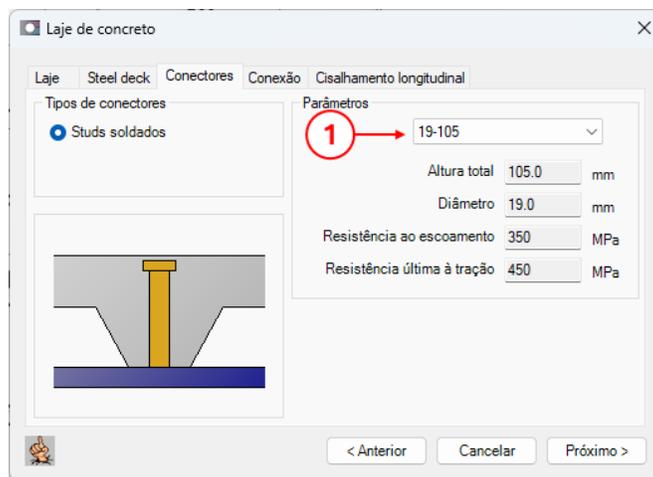


Figura 48 – Configuração da aba Conectores.

Ressalta-se que os conectores devem ter altura tal que após instalados sua projeção acima do topo da fôrma seja igual ou superior a 40 mm. A disposição dos conectores de cisalhamento é definida na aba **Conexão** (Figura 49). Para este exemplo, a seguinte configuração será admitida:

- (1) uma linha única de conectores, selecionando o **Número de linhas** igual a um;
- (2) um conector por nervura, escolhendo **Disposição a cada** nervura.

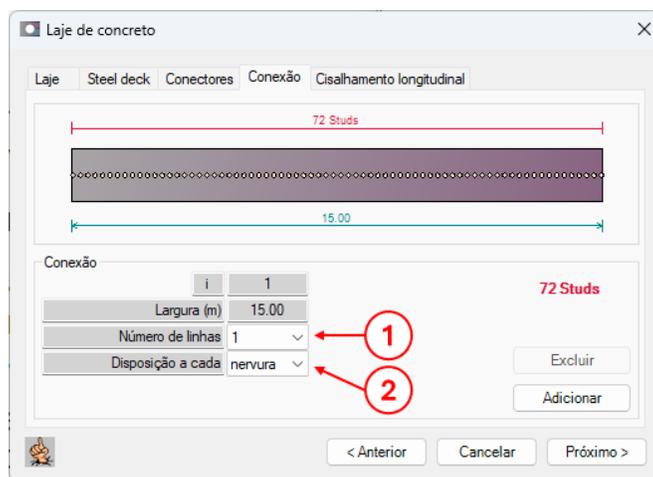


Figura 49 – Parâmetros da disposição dos conectores na aba Conexão.

Na aba **Cisalhamento longitudinal** são definidos os parâmetros para o cálculo da resistência ao cisalhamento da viga mista e eventual dimensionamento de uma armadura de costura. Para este exemplo, admitir nervura de concreto contínua, sem a contribuição do *steel deck*, conforme mostrado na Figura 50.

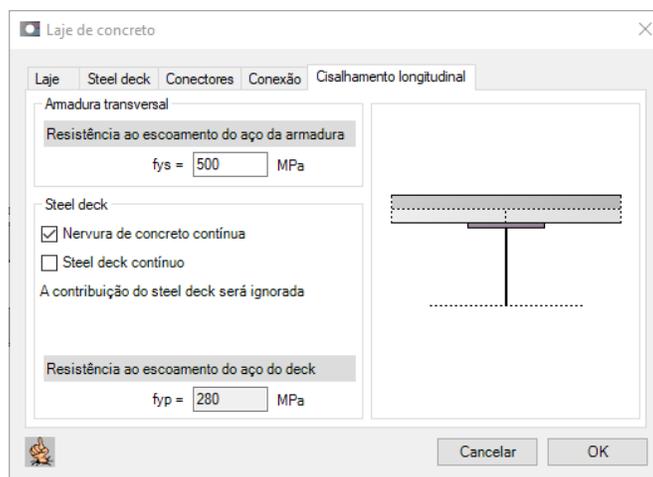


Figura 50 – Parâmetros para a verificação ao cisalhamento longitudinal.

→ Configuração de células

Na janela **Configuração de células** (Figura 51) é possível modificar as aberturas individualmente. As aberturas selecionadas pelo usuário podem ser definidas como **células normais** ou **células preenchidas**, conforme a seguir:

- (1) selecione uma abertura;
- (2) configure a abertura como célula normal ou célula preenchida.

Para este exemplo, nenhuma modificação nas células será realizada. Clique no botão **Próximo** no canto inferior direito da janela para prosseguir.

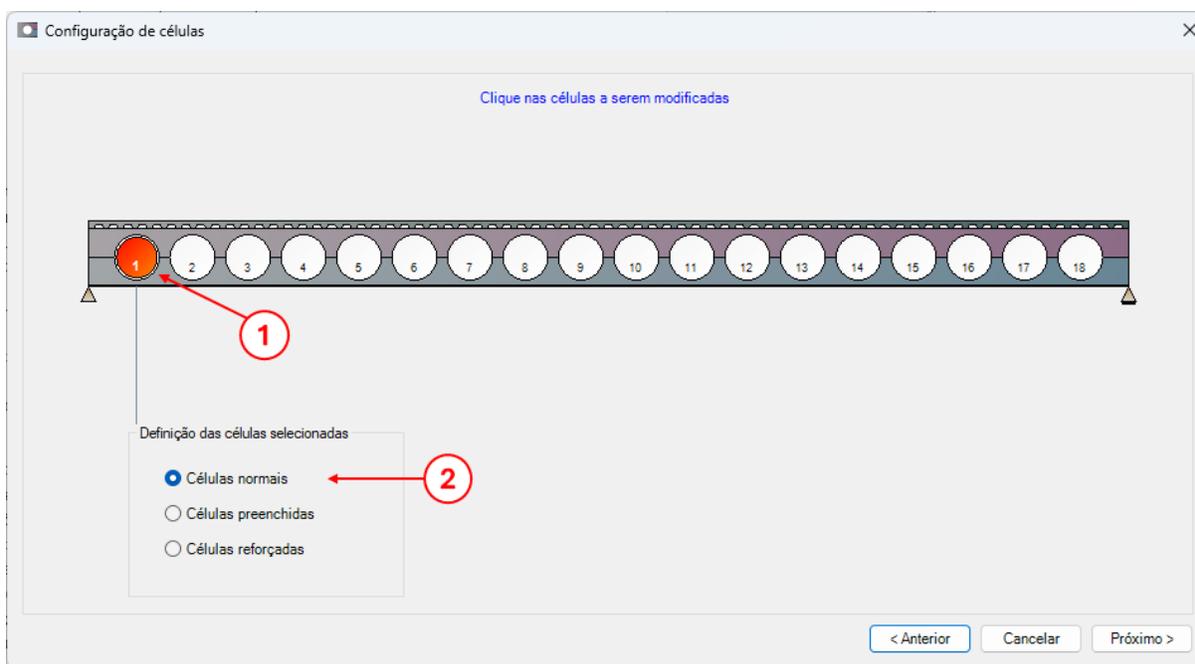


Figura 51 – Opções na janela Configuração de células.

→ Enrijecimento de montantes de alma

O VCA+ possibilita a especificação de enrijecedores nos montantes de alma (Figura 52). Na janela “Enrijecimento de montantes de alma”:

- (1) clique em um montante para adicionar ou remover um enrijecedor;
- (2) especifique a largura, a espessura e a resistência do aço do enrijecedor.

Por hora, nenhum montante de alma será enrijecido. Clique no botão **Próximo** no canto inferior direito para prosseguir.

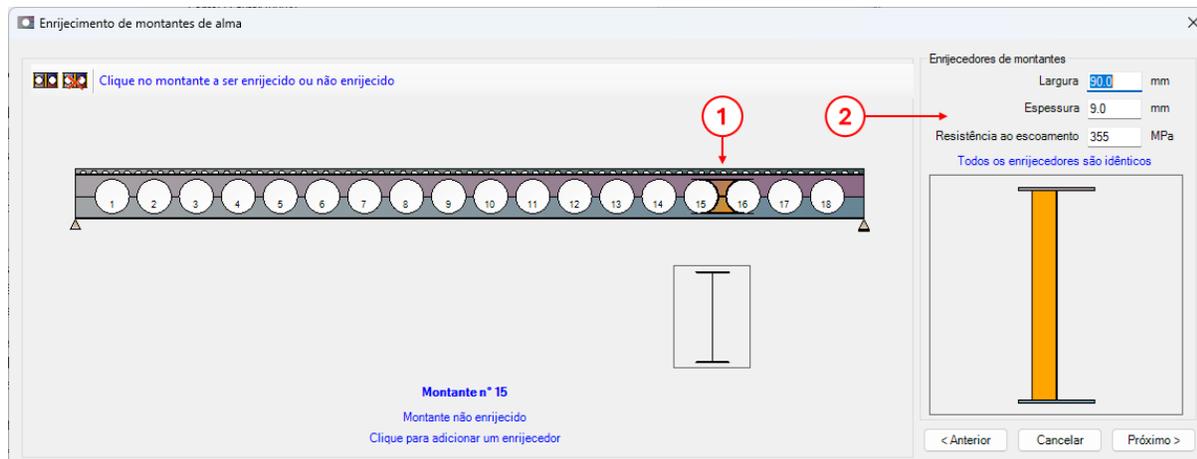


Figura 52 – Definição dos parâmetros para os enrijecedores de montante de alma.

→ Contenção lateral da viga

A configuração de contenção lateral é feita na janela **Contenção lateral da viga** (Figura 53). Para vigas mistas, a contenção lateral contínua na fase de utilização é garantida pela laje de concreto. Não obstante, é possível considerar situações sem contenção lateral, ou com contenções parciais, para a etapa de construção. Neste momento, a seguinte consideração será feita para a contenção lateral na etapa de construção:

- (1) escolher a opção **Contenções laterais a serem definidas**; nenhuma contenção lateral será definida, de modo que a viga será verificada na etapa de construção com um comprimento destravado igual ao comprimento total;
- (2) o programa avisa ao usuário que a FLT será considerada somente para a etapa de construção.

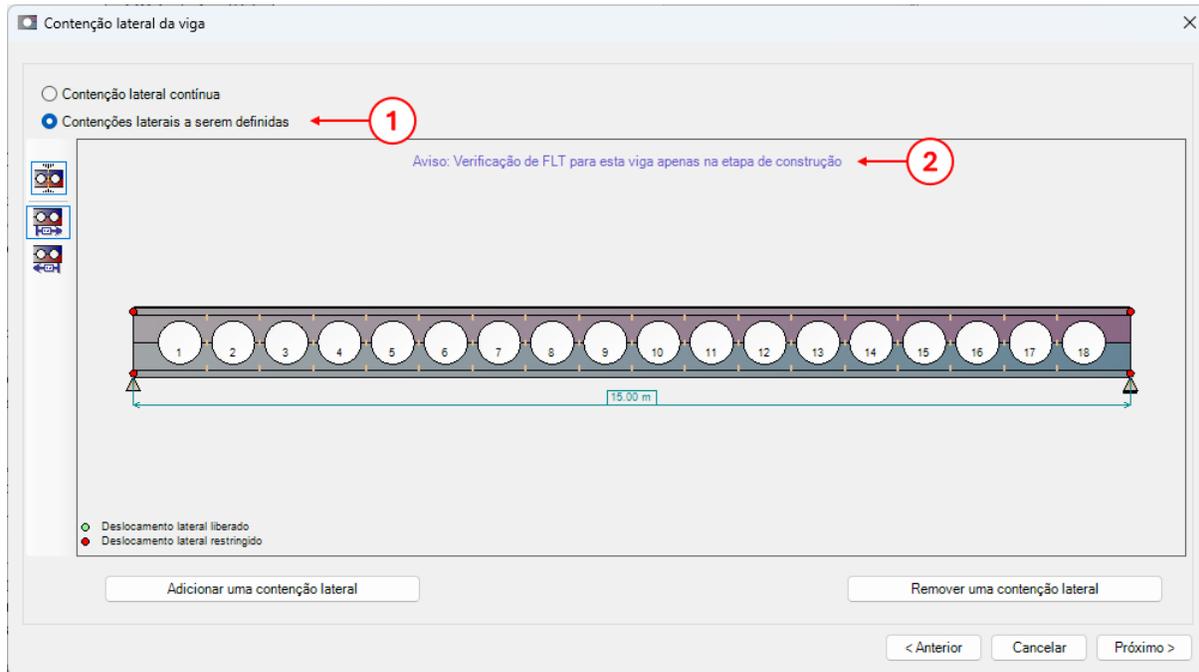


Figura 53 – Configuração da janela Contenção lateral da viga.

Após a configuração da contenção, clique no botão **Próximo** para prosseguir.

→ Definição dos casos de carregamento

Os carregamentos são definidos na janela **Definição dos casos de carregamento**. O VCA+ permite a definição de quatro casos de carregamento, sendo um de ação permanente (G), dois de sobrecarga de utilização (Q1 e Q2), e um de construção (QC).

Para cada caso de carregamento, diferentes cargas podem ser definidas, conforme mostrado a seguir. Após a definição de todos os carregamentos, clique no botão **OK** no canto inferior direito da janela.

→ Ações permanentes (G)

O VCA+ considera automaticamente o peso próprio da viga de aço. Portanto, faz-se necessário inserir apenas a carga permanente de superfície aplicada sobre a largura de influência da viga, conforme a seguir (Figura 54):

- (1) selecione o caso de carregamento **G – Ações permanentes**;
- (2) o peso próprio da viga de aço é automaticamente considerado;
- (3) insira a carga de superfície de **1,00 kN/m²**.

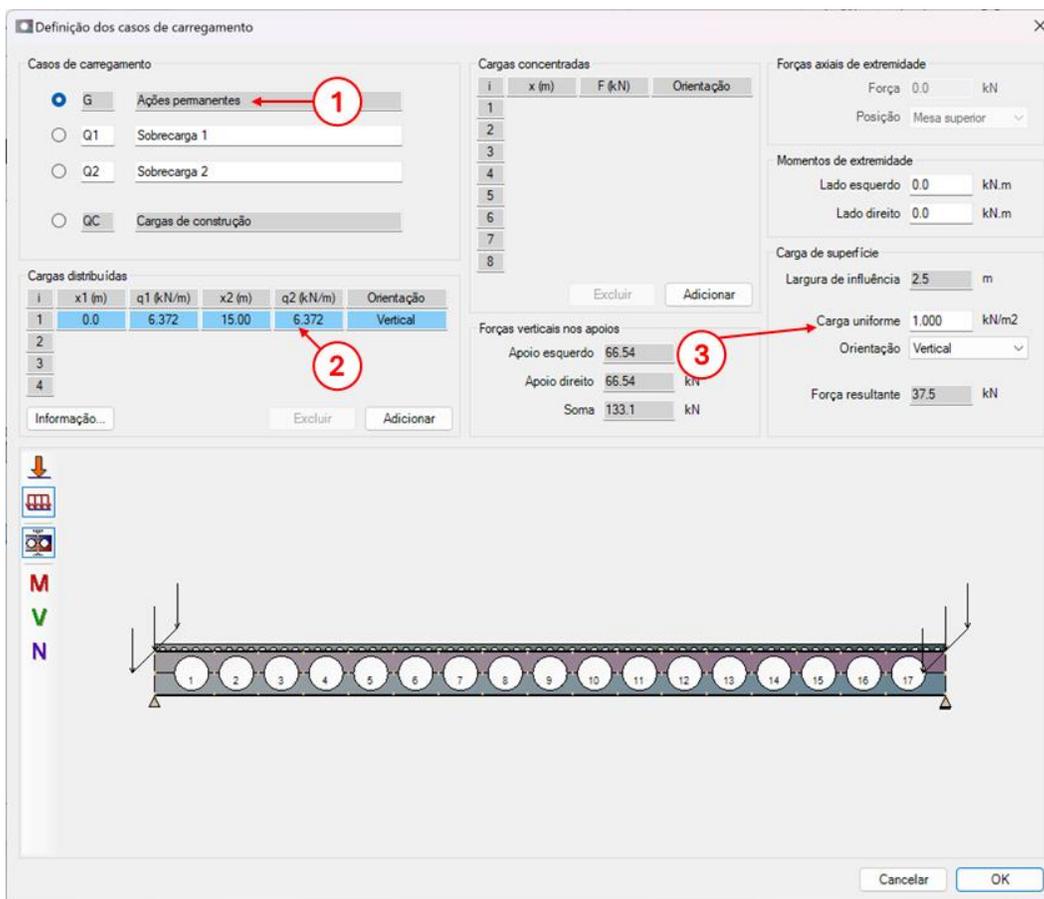


Figura 54 – Janela para a definição dos casos de carregamento – ações permanentes.

→ Sobrecarga Q1

Para inserir a sobrecarga Q1, siga os seguintes passos (Figura 55):

- (1) selecione o caso de carregamento **Q1 – Sobrecarga 1** ;
- (2) no painel **Carga de superfície**, insira a carga de **3,0 kN/m²** .

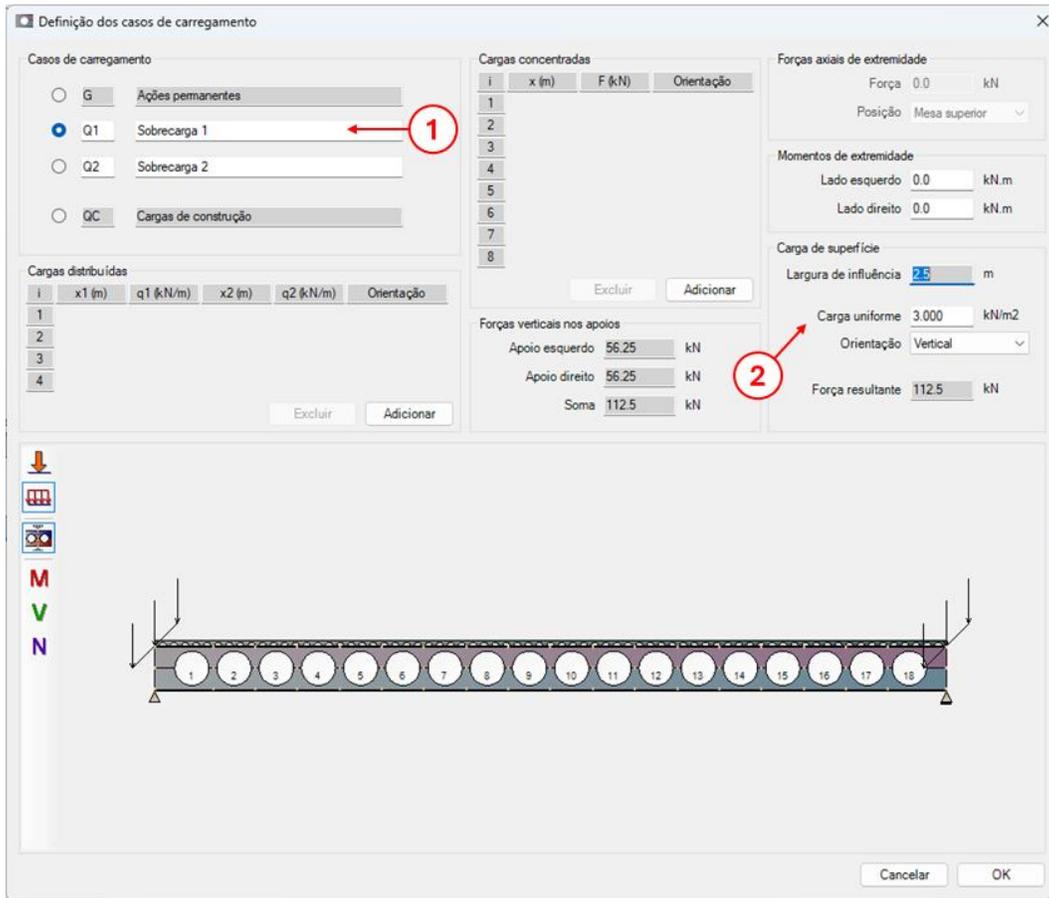


Figura 55 – Janela para a definição dos casos de carregamento – sobrecargas.

→ Carga de construção QC

Para inserir a carga de construção QC (Figura 56):

- (1) selecione o caso de carregamento **QC – Cargas de construção** ;
- (2) no painel **Carga de superfície**, insira a carga de **1,0 kN/m²**.

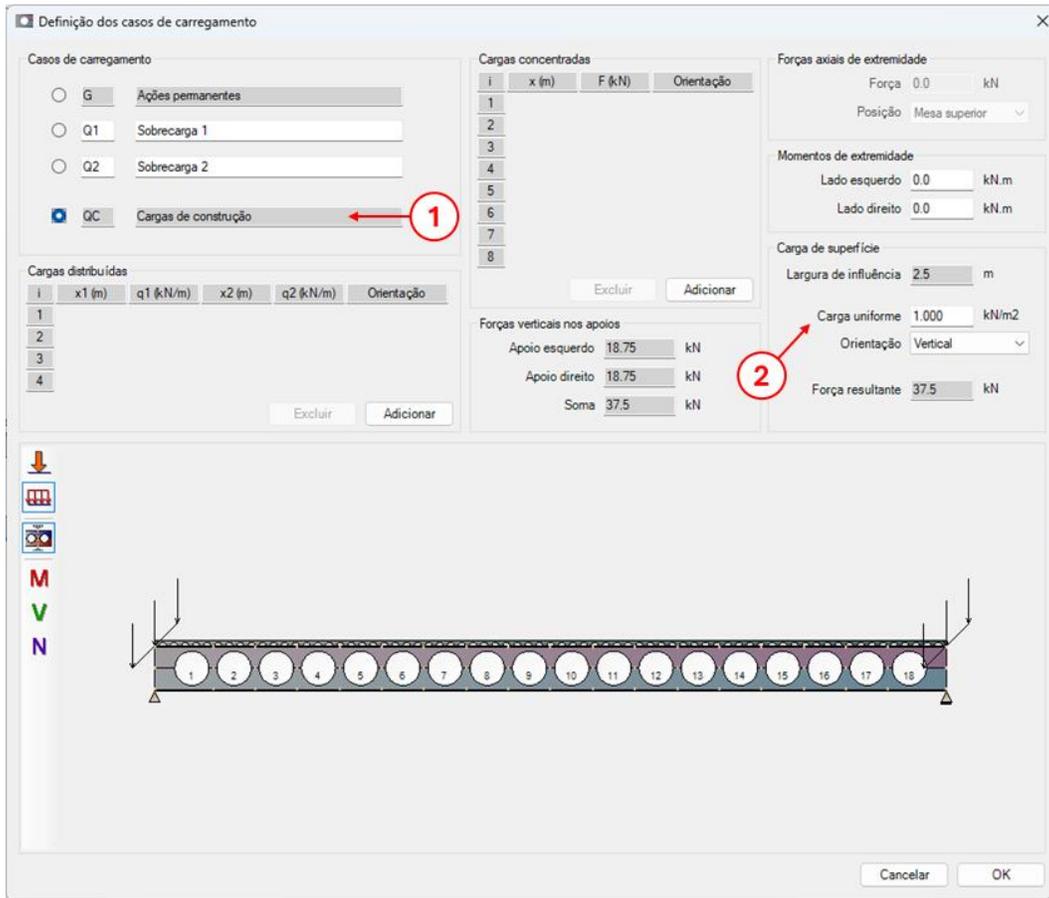


Figura 56 – Janela para a definição dos casos de carregamento – cargas de construção.

Os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação podem ser alterados na janela **Coefficientes Gama** (Figura 57). O VCA+ carrega automaticamente os valores padrão em conformidade com a ABNT NBR8800:2024, definidos no menu **Opções > Opções do software > Coeficientes nacionais padrão**. Para recuperar os valores padrão, basta clicar no botão **Reiniciar** no canto inferior esquerdo da janela. Neste exemplo, os valores mostrados na Figura 57 foram utilizados.

Coeficientes Gama

Fatores para o cálculo da viga

Coef. de ponderação das ações

$\gamma_{g,sup}$ = 1.400

$\gamma_{g,inf}$ = 1.000

γ_q = 1.500

$\gamma_{g,fi}$ = 1.100

Usar os valores padrão

Reiniciar

Fatores de combinação

Q1 : Sobrecarga 1

Q2 : Sobrecarga 2

	Q1	Q2
ψ_0	0.70	0.70
ψ_1	0.60	0.60
ψ_2	0.40	0.40

Coeficientes de resistência

Aço = 1.100

Incêndio = 1.350

Cancelar OK

Figura 57 – Configuração dos coeficientes de ponderação e fatores de combinação.

→ Combinações de ações

As verificações no VCA+ são feitas para ELU, ELS e ELU sob incêndio. Para cada estado-limite, o VCA+ dispõe de regras de combinações de ações com base nos coeficientes de ponderação e fatores de combinação padrão. Além disso, é possível definir combinações de ações personalizadas. A definição das combinações de ações é feita na janela **Combinações de ações** (Figura 58), conforme a seguir:

- (1) escolha a aba de acordo com o **estado-limite** desejado;
- (2) ative ou desative as **regras** de combinação a serem consideradas (as regras de combinação de ações não podem ser editadas);
- (3) ative ou desative combinações personalizadas de ações (neste caso, o usuário deve informar manualmente os coeficientes para cada ação).

Siga os passos acima para configurar as combinações de ações de acordo com o enunciado do exemplo. Em seguida, clique no botão **OK** para prosseguir.

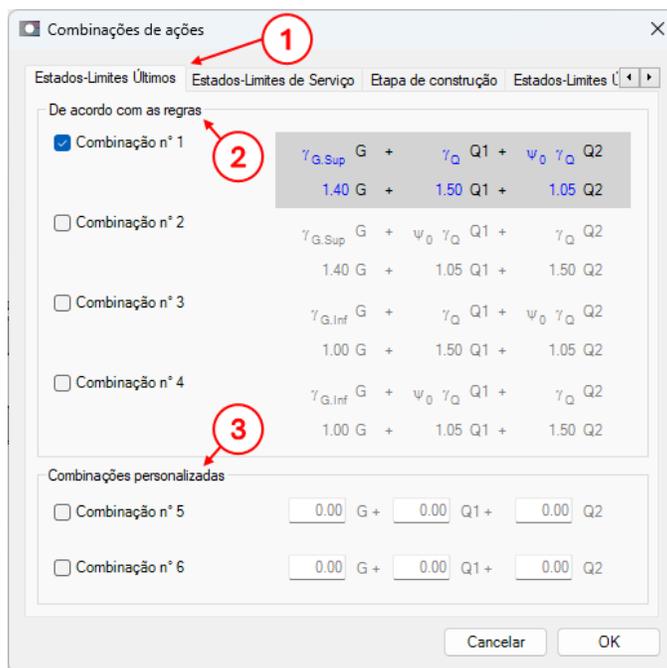


Figura 58 – Definição das combinações de ações.

→ Resultados – Relatório de Projeto Preliminar

Após a correta configuração de todos os parâmetros apresentados nos itens 0 a 0, clique no botão  na barra de ferramentas principal para gerar o **Relatório de Projeto Preliminar** (Figura 59). No menu **Opções**, marque o item **Relatório Detalhado** (1).

Em seguida, vá até a página 23 do relatório onde os **resumos dos critérios** dos ELU são apresentados (Figura 60). Note que todos os critérios foram verificados com êxito, exceto a resistência à flambagem dos montantes, onde o montante nº 17 apresentou uma taxa de carregamento de 1,072 para a combinação de ações U1 no ELU (2). O montante nº 17 corresponde ao primeiro e ao último montante de alma (ver croqui da viga no relatório). O esforço cortante nessa região é próximo ao valor máximo, fazendo com que o esforço de compressão na seção crítica do montante de alma ultrapasse a sua resistência à flambagem.

Neste exemplo, o aumento da resistência à flambagem do montante de alma será realizado por meio do acréscimo da largura do montante de alma. Para isso, o espaçamento entre as células será aumentado, de modo que a largura do montante de alma fique maior.



Figura 59 – Relatório de Projeto Preliminar.

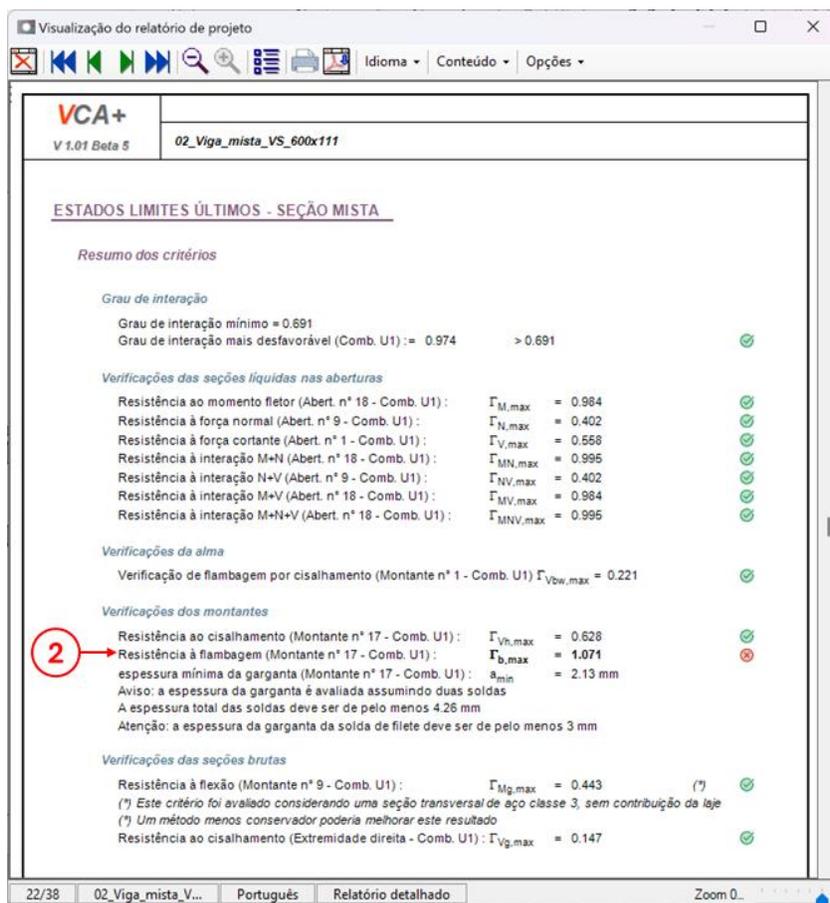


Figura 60 – Resumos dos critérios – Estados-limites últimos (ELU).

→ Aumento da largura do montante de alma

A largura do montante de alma será aumentada indiretamente, por meio do acréscimo no espaçamento das células. Para isso, clique no botão  da barra de ferramentas para abrir a janela **Corte das vigas** e siga os passos abaixo (Figura 61).

- (1) Mantenha o **diâmetro das células** com o valor de 650 mm.
- (2) Aumente o **espaçamento** das células para 850 mm.
- (3) Clique em **buscar as soluções**.
- (4) Escolha a solução encontrada.

Note que o número de células foi reduzido de 18 para 17.

Após a alteração do corte da viga, clique no botão **OK** no canto inferior direito da janela para prosseguir. Em seguida, abra novamente o **Relatório de projeto preliminar**. Observe que a resistência à flambagem

do montante de alma (3) foi verificada com êxito, após o enrijecimento dos montantes de alma problemáticos.

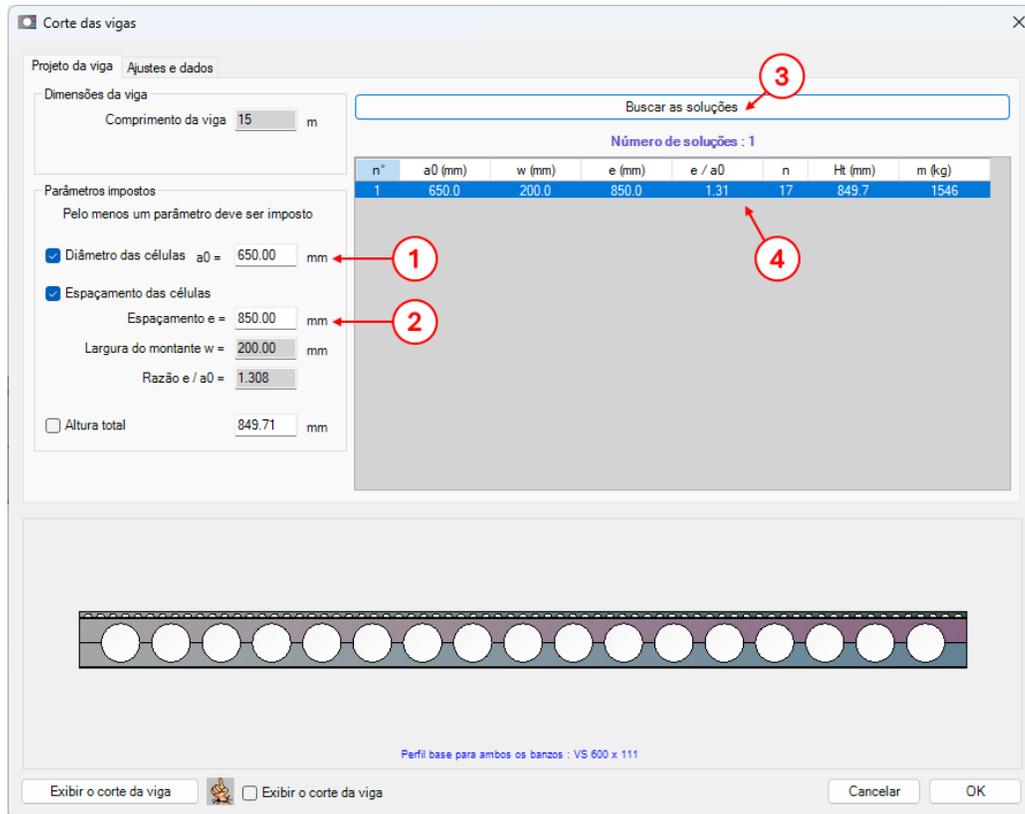


Figura 61 – Configuração do enrijecimento de montantes de alma.

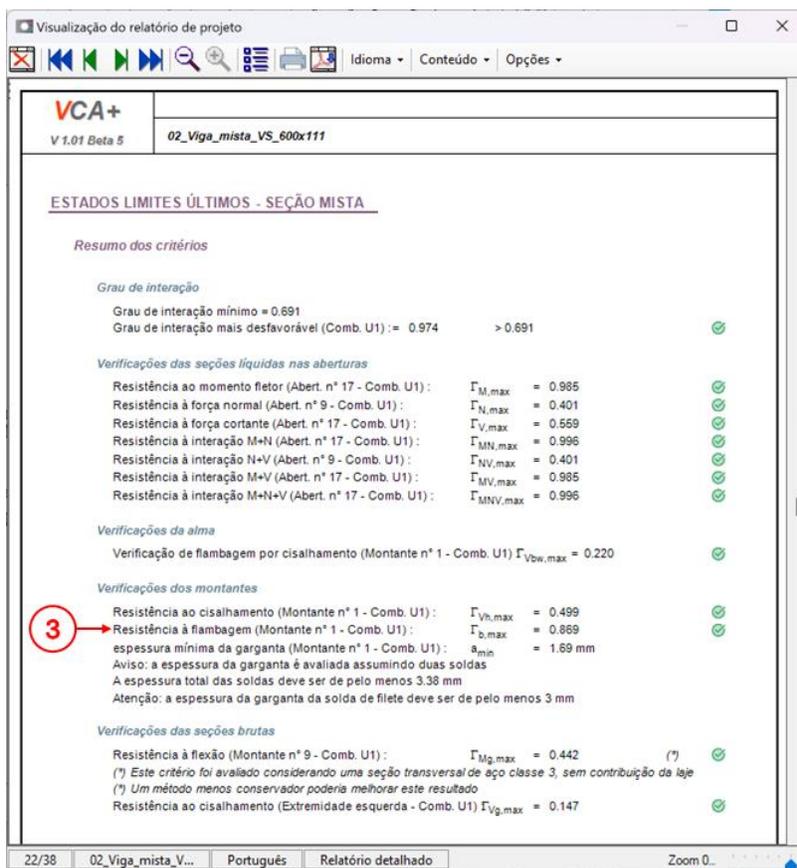


Figura 62 – Verificação da resistência à flambagem do montante de alma – solução com enrijecedores de montante de alma.

→ Verificação do ELS de deformação excessiva

A verificação da deformação excessiva foi realizada para as combinações quase-permanente e rara de serviço. Os resultados podem ser obtidos na seção de flechas dos estados-limites de serviço no relatório preliminar de projeto. Conforme mostrado na Figura 63, as flechas para as combinações quase-permanente e rara foram $L/466$ e $L/378$, respectivamente.

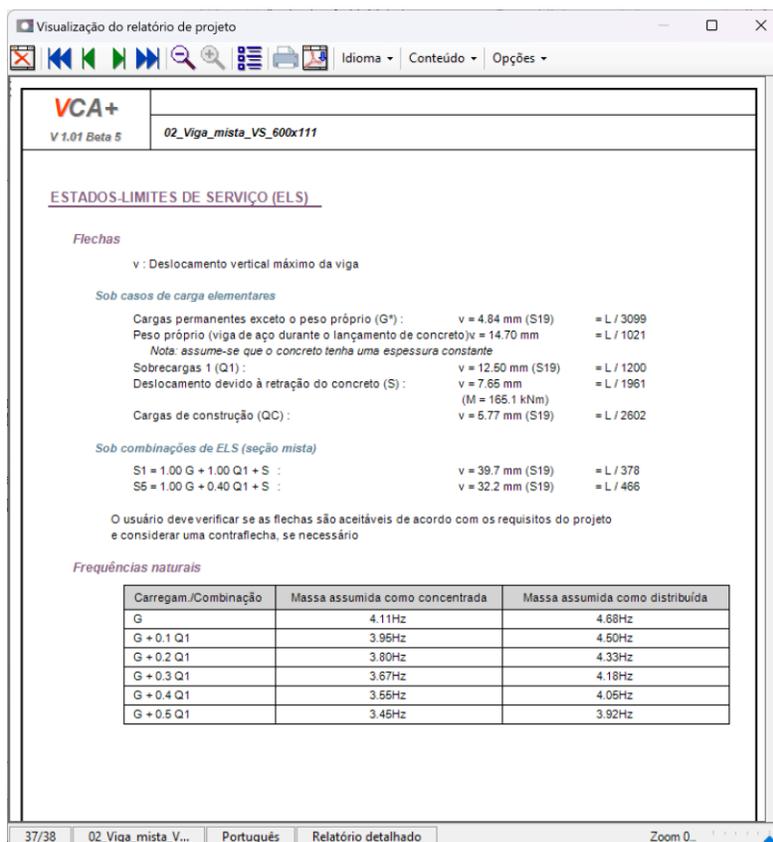


Figura 63 - Resultados do estado-limite de serviço de deformações excessivas.

4 CONCLUSÃO

Neste artigo é apresentada uma visão abrangente sobre as vigas celulares de aço, abordando sua origem, fabricação, vantagens, aplicações e comportamento estrutural, com ênfase na ferramenta computacional VCA+, desenvolvida para auxiliar seu projeto e dimensionamento conforme as normas brasileiras. O conteúdo apresentado reforça o potencial técnico e estético das vigas celulares de aço na construção civil brasileira, destacando a importância de ferramentas de projeto adequadas para garantir segurança, eficiência e economia. O artigo fornece orientações práticas para determinação do diâmetro e do espaçamento das aberturas; razões de expansão, limites geométricos e critérios de estabilidade; estratégias de reforço (fechamento de aberturas, enrijecedores etc.). Também propõe fluxogramas para o pré-dimensionamento com o software VCA+. É uma contribuição à disseminação de conhecimento prático e à promoção do uso de tecnologias computacionais compatíveis com as normas nacionais, alinhada ao ODS 9 da ONU (Indústria, Inovação e Infraestruturas).

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- [1] Fares, S.S.; Coulson, J.; Dinehart, D.W. Castellated and Cellular Beam Design. Steel Design Guide #31. American Institute of Steel Construction, 2016.
- [2] GRÜNBAUER, 2012 Disponível em: <https://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm> acessado em 30/04/12.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] ArcelorMittal Europe. ACB® Vigas Alveolares. Long Carbon Europe – Sections and Merchant Bars. 2018.
- [7] CMC Steel Products. Disponível em: <http://www.cmcsteelproducts.com> acessado em 30/04/2012.
- [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] 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.
- [10] Hechler, O.; Müller, C.; Sedlacek, G. Investigations on beams with multiple regular web openings, Architectural Engineering Conference. USA. 2006.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Kerdal, D.; Nethercot, D. A. Failure modes for castellated beams. Journal of Constructional Steel Research, v. 4, p. 295-315, 1984.

- [14] 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.
- [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] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] VCA Plus. Software para cálculo de vigas celulares. ArcelorMittal Brasil, 2025.
- [20] 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.
- [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] 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.
- [24] ABNT (2024): 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.
- [25] 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.