



ArcelorMittal

Manual de Vigas Celulares



Manual de Vigas Celulares

ArcelorMittal

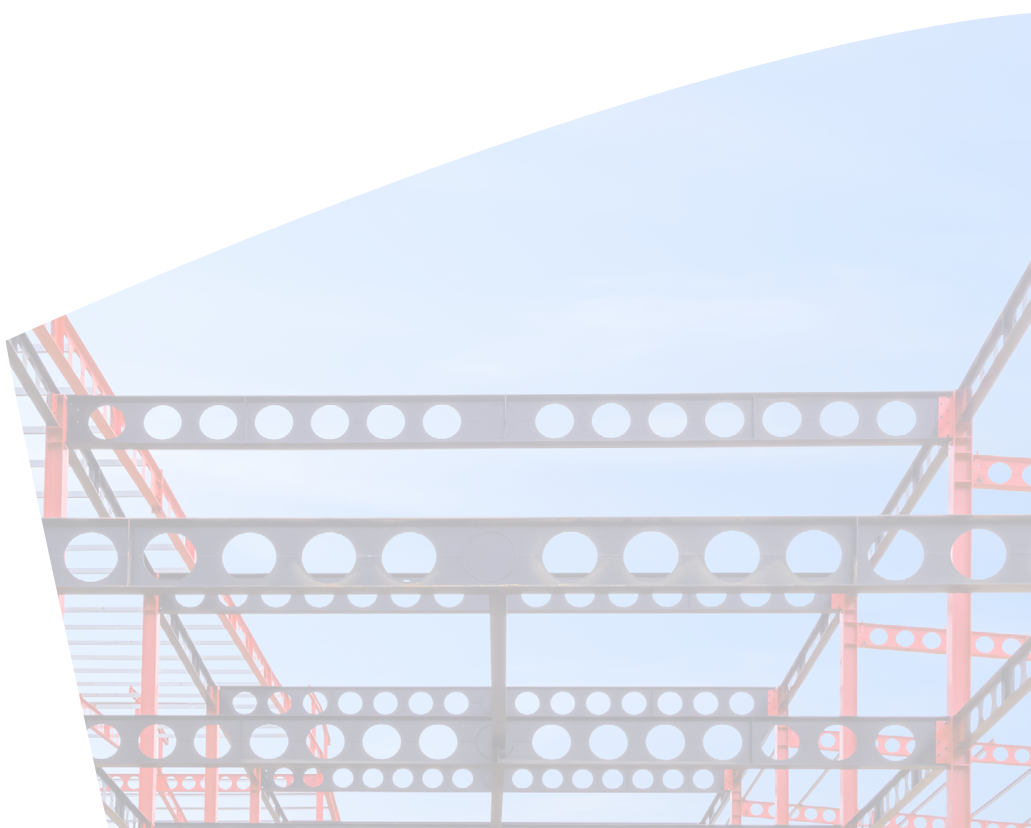
Produzido pela ArcelorMittal Brasil em cooperacao com os pesquisadores:

Gustavo de Souza Verissimo
Felipe Isamu Harger Sakiyama

Apresentação

Este manual apresenta uma visão geral sobre vigas celulares metálicas, bem como recomendações e procedimentos que podem auxiliar profissionais do setor da construção civil a conhecerem e utilizarem esses elementos estruturais, tirando o melhor proveito de seus atributos. Apresenta, também, o funcionamento do Software VCA+ (*Viga celular ArcelorMittal*), disponibilizado pela ArcelorMittal, e demonstra sua aplicação por meio de alguns exemplos de projeto e dimensionamento desses elementos.

Os autores



1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Vigas alveolares e vigas celulares.....	8
1.2	Nomenclatura.....	8
1.3	Histórico	9
1.4	Vantagens das vigas celulares.....	10
1.5	Processo de fabricação	11
1.6	Fabricação como perfil soldado	11
1.6.1	Vigas celulares com eixo reto	13
1.6.2	Viga celular com eixo curvo	13
1.6.3	Viga celular com altura variável	14
1.6.4	Vigas celulares com seções assimétricas	15
	Referências	17
2	SOBRE O USO DE VIGAS CELULARES	18
2.1	Entendendo as vantagens do sistema.....	18
2.1.1	Aproveitamento do espaço construído e integração de instalações	18
2.1.2	Maior flexibilidade e competitividade para o layout do pavimento.....	19
2.1.3	Eficiência construtiva	20
2.1.4	Desempenho à vibração	20
2.2	Principais aplicações	21
2.2.1	Edifícios garagem	21
2.2.2	Sistemas de cobertura	22
2.2.3	Requalificação de edificações antigas.....	24
	Referências	25
3	PROJETO DE VIGAS CELULARES.....	26
3.1	Critérios para projeto.....	26
3.1.1	Tamanho e espaçamento dos alvéolos	26
3.1.2	Considerações sobre a razão de expansão da viga celular	27
3.1.3	Comprimento de projeto	29
3.1.4	Definição geométrica inicial das vigas celulares	30
3.2	Detalhes construtivos adicionais.....	34
3.2.1	Aberturas preenchidas	35
3.2.2	Reforço das aberturas	35
3.2.3	Enrijecimento do montante.....	36

3.2.4	Alongamento de abertura para passagem de tubulação.....	36
3.2.5	Ligações rígidas nas extremidades da viga celular.....	37
3.3	Outras considerações	38
3.3.1	Cargas concentradas.....	38
3.3.2	Estabilidade na montagem	41
3.3.3	Resistência a fogo	41
3.3.4	Proteção e pintura	45
	Referências	46
4	CONHECENDO O VCA+	47
4.1	Apresentação	47
4.2	Escopo geral de aplicação do Software VCA+	47
4.2.1	Vigas celulares.....	47
4.2.2	Vigas com aberturas especiais na alma (AEA).....	48
4.3	Configuração e opções do Software VCA+	49
4.4	Parâmetros gerais da viga.....	50
4.4.1	Viga celular mista	51
4.4.2	Viga celular de altura variável	52
4.4.3	Viga celular curva.....	53
4.4.4	Viga com aberturas especiais na alma (AEA).....	54
4.5	Parâmetros específicos da viga.....	54
4.6	Recursos do VCA+	54
4.7	Critérios de verificação	55
4.8	Resultados apresentados pelo Software VCA+	57
4.9	Recursos especiais do VCA+	57
5	PRÉ-DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO NO VCA+	59
5.1	Catálogo VCS ArcelorMittal.....	59
5.2	Vigas celulares de eixo reto.....	59
5.3	Vigas celulares de eixo curvo.....	60
5.4	Diretrizes para solucionar problemas de dimensionamento	62
6	EXEMPLOS.....	65
6.1	Viga celular com perfil soldado VS	65
6.1.1	Criar uma viga no VCA+	66
6.1.2	Identificação do projetista.....	66
6.1.3	Vão e posição da viga.....	67
6.1.4	Seção transversal.....	68

6.1.5	Corte da viga.....	68
6.1.6	Configuração de células.....	70
6.1.7	Enrijecimento de montantes de alma	70
6.1.8	Contenção lateral da viga.....	71
6.1.9	Definição dos casos de carregamento	72
6.1.10	Coeficientes Gama	74
6.1.11	Combinações de ações.....	75
6.1.12	Resultados – Relatório de Projeto Preliminar	76
6.2	Viga celular com perfil soldado VCS	82
6.2.1	Criar uma viga a partir de um caso existente	82
6.2.2	Seção transversal.....	83
6.2.3	Corte da viga.....	84
6.2.4	Resultados – Relatório de Projeto Preliminar	84
6.3	Viga celular mista com perfil duplamente simétrico	85
6.3.1	Criar a viga no VCA+	86
6.3.2	Identificação do projetista.....	87
6.3.3	Vão e posição da viga.....	88
6.3.4	Seção transversal.....	88
6.3.5	Corte da viga.....	89
6.3.6	Laje de concreto	90
6.3.7	Configuração de células.....	93
6.3.8	Enrijecimento de montantes de alma	94
6.3.9	Contenção lateral da viga	95
6.3.10	Definição dos casos de carregamento	95
6.3.11	Coeficientes de ponderação e fatores de combinação	99
6.3.12	Combinações de ações.....	99
6.3.13	Resultados – Relatório de Projeto Preliminar	100
6.4	Viga celular mista – comparativo entre os perfis VS e VCS	104
6.5	Viga celular mista com perfil monossimétrico	105
6.6	Viga celular de eixo curvo para cobertura de galpão.....	108
6.6.1	Criar uma viga no VCA+	109
6.6.2	Identificação do projetista.....	109
6.6.3	Vão e posição da viga.....	109
6.6.4	Seção transversal.....	110
6.6.5	Corte da viga.....	110
6.6.6	Contenção lateral da viga	110
6.6.7	Definição dos casos de carregamento	111
6.6.8	Combinações de ações.....	111
6.6.9	Resultados – Relatório de Projeto Preliminar	112

ANEXO A – COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS CELULARES	114
A.1 Distribuição de esforços e tensões	114
A.2 Modos de falha das vigas celulares	116
A.2.1 Formação de mecanismo plástico.....	116
A.2.2 Flambagem lateral com torção (FLT).....	118
A.2.3 Flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV).....	118
A.2.4 Flambagem do montante de alma por compressão (FMAC).....	118
A.2.5 Escoamento do montante de alma por tensões combinadas (EMAMV).....	119
A.2.6 Sobre a verificação dos modos de falha.....	121
A.3 Vigas celulares mistas.....	121
A.4 Seções críticas em vigas celulares.....	123
Referências	127

1 Introdução

1.1 Vigas alveolares e vigas celulares

A expressão “vigas alveolares” é uma designação genérica para os tipos de vigas que possuem seqüências regulares de aberturas nas almas. Atualmente, com a tecnologia das máquinas CNC – Comando Numérico Computadorizado – é possível fazer cortes com diferentes geometrias nas almas dos perfis I, obtendo-se diferentes tipologias de vigas alveolares (Figura 1).

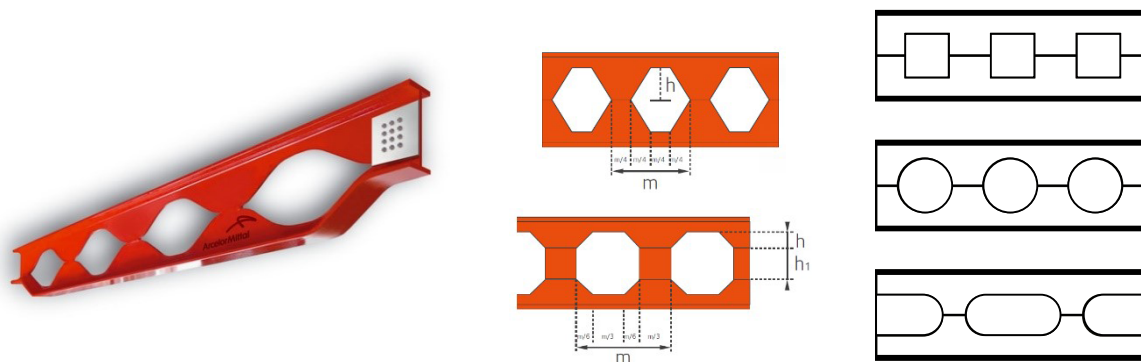


Figura 1 – Tipos de vigas alveolares.

Uma viga celular de aço é um tipo específico de viga alveolar caracterizada por possuir aberturas circulares na alma, como mostrado na Figura 2.

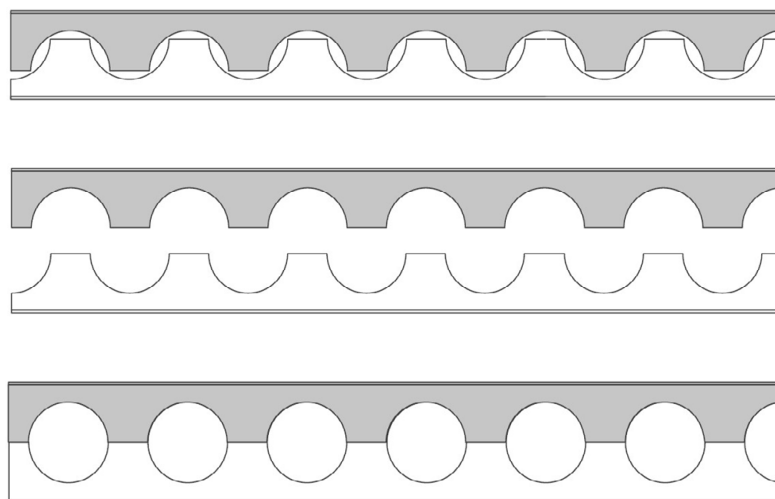


Figura 2 – Representação esquemática da fabricação de uma viga celular a partir do corte de um perfil I metálico.

1.2 Nomenclatura

É possível identificar diferentes elementos geométricos em uma viga celular, conforme exibido na Figura 3. O trecho de alma entre duas aberturas adjacentes, por exemplo, é denominado “montante de alma”, enquanto que a distância entre os centros de duas aberturas adjacentes é chamada de “passo” da viga.

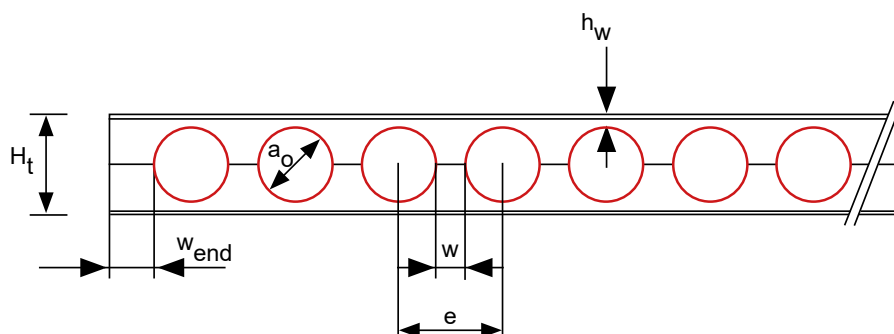


Figura 3 – Elementos geométricos de uma viga celular.
(fonte: ArcelorMittal Europa)

Seguem-se as descrições dos parâmetros indicados na Figura 3:

- 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;
- h_w é a altura da seção "T" no centro de uma abertura.

1.3 Histórico

As primeiras "vigas alveolares" surgiram por volta dos anos 1930, como uma solução alternativa para suprir a gama limitada de perfis I disponíveis na época. Usualmente, são obtidas a partir de um perfil I de alma cheia, cortando-se longitudinalmente a alma do perfil, conforme mostrado na Figura 4.

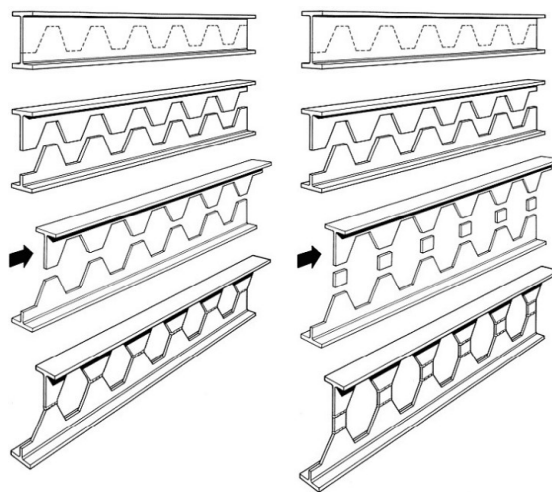


Figura 4 – Esquema do processo de fabricação de uma viga castelada.
(adaptado de GRÜNBAUER, 2012)

Após o corte, as duas metades obtidas são deslocadas e, então, soldadas, dando origem a um novo perfil com altura superior ao perfil original e com uma sequência de aberturas na alma, geralmente denominados "alvéolos" por lembrarem os hexágonos encontrados nos favos de mel.

Originalmente, essas vigas foram chamadas de vigas casteladas pelo fato de a metade cortada lembrar a muralha de um castelo medieval com suas ameias, que são as aberturas no alto das muralhas onde os arqueiros se posicionavam para defesa. Esse processo de fabricação é usualmente referido como “castelação”.

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. O processo de corte da viga celular foi criado no Reino Unido e patentado pela companhia britânica *Westok Structural Services Ltd*. A patente das vigas celulares vigorou até 2009, quando a tecnologia se tornou de domínio público.

1.4 Vantagens das vigas celulares

As vigas celulares apresentam uma série de vantagens em relação aos perfis que as originam. Tal conjunto de benefícios tem motivado arquitetos e engenheiros em todo o mundo a empregar perfis celulares das mais diversas formas, podendo-se citar:

- Maior inércia com relação ao principal eixo de flexão e, portanto, maior rigidez às deformações e maior resistência ao momento fletor;
- Possibilidade de vencerem vãos maiores do que os perfis originais, propiciando maior distância entre pilares e, portanto, maior aproveitamento do espaço da construção;
- As aberturas na alma melhoram a aparência interior, facilitam a passagem da luz natural, a circulação do ar e a evacuação de fumaça, além de possibilitarem a integração das instalações prediais, como elétrica e hidráulica, com a estrutura;
- Sua aparência leve, combinada com sua alta resistência, possibilita aos arquitetos criarem diversas formas estruturais;
- São 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.

As vigas celulares possuem alturas de 1,3 a 1,4 vezes superiores aos perfis de alma cheia que as originam, e, portanto, são mais resistentes e menos sensíveis a deformações. Com maiores inércia, podem receber cargas entre 10% e 50% maiores que as vigas de alma cheia originais para um mesmo vão, e/ou atingir vãos livres maiores sem aumento do seu peso.

As aberturas na alma de uma viga celular podem afetar seu desempenho estrutural. Seu emprego é mais indicado para grandes vãos e carregamento uniformemente distribuído.

Existe ainda mais um fator que influencia a escolha das vigas celulares e que, de certa forma, independe dos custos: o apelo estético. Com o desenvolvimento das construções com estrutura de aço, tem-se observado um interesse crescente na utilização de perfis celulares, com o objetivo de explorar o efeito estético que eles produzem no ambiente.

1.5 Processo de 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, sendo o corte feito automaticamente, como ilustrado na Figura 5, que mostra vários maçaricos cortando diversos perfis simultaneamente.

Após a realização do corte, as metades são reposicionadas de modo a formarem-se as aberturas circulares, a alma é soldada, obtendo-se uma viga celular. Os perfis I originais podem ser tanto laminados como soldados.

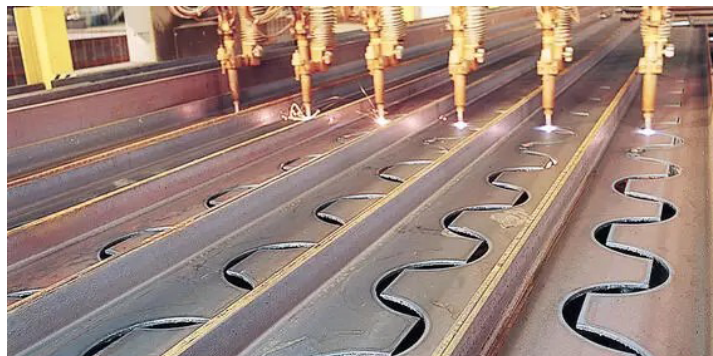


Figura 5 – Corte nas almas dos perfis I para produção das metades de uma viga celular.
(foto: ArcelorMittal Europa)

1.6 Fabricação como perfil soldado

Conforme mencionado, uma viga celular também pode ser fabricada a partir de perfis soldados. Essa alternativa apresenta vantagens importantes, como a possibilidade de se produzir vigas com alturas superiores às obtidas com perfis laminados, além da possibilidade de se obter maior otimização da seção com relação a seu uso. A sua fabricação pode ser feita de três formas:

- 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, conforme exibido na Figura 6;

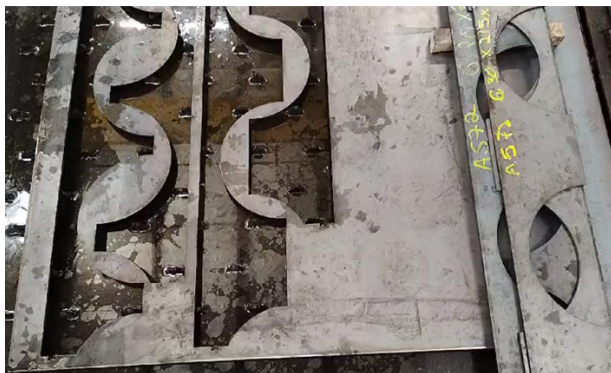


Figura 6 – Corte e montagem de uma viga celular soldada.

- b) 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 7);
- c) A partir do corte de um perfil I soldado, como mostrado nas Figuras 4 e 5.



Figura 7 – 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 7, apresenta vantagens e desvantagens, tais como:

- A configuração dos alvéolos é “mais livre”, uma vez que não se depende do corte simétrico. O seu espaçamento e tamanho podem ser variáveis;
- Pode-se fabricar vigas mais altas do que as que se consegue a partir dos perfis laminados ou soldados disponíveis nos catálogos;
- A perda de material é maior do que quando a alma é cortada conforme o padrão mostrado na Figura 9.

As vigas celulares tendem a ser mais leves do que os perfis de alma cheia de mesma altura devido às aberturas na alma, viabilizando, por exemplo, a redução do peso do elemento. No entanto, embora a viga celular propicie essa possível economia, deve-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. É preciso avaliar o custo final das opções: (1) o perfil de alma cheia que, apesar de mais pesado, já está pronto para ser usado; (2) a treliça, que é leve, mas consome mais tempo e mão de obra na montagem; e (3) a viga celular, que também é leve, mas requer tempo e mão de obra para sua fabricação.

Eventualmente, requisitos arquitetônicos podem exigir vigas com uma geometria tal que somente podem ser obtidas como vigas soldadas, como no caso mostrado na Figura 8.



Figura 8 – Vigas celulares soldadas com geometria especial

(fonte: <http://www.metalica.com.br/edificio-sede-bruning-tecnometal> – acessado em 22/02/2012).

1.6.1 Vigas celulares com eixo reto

As vigas celulares com eixo reto são as que apresentam o processo de fabricação mais simples. Elas são obtidas pela sequência de corte longitudinal, deslocamento e solda conforme ilustrado na Figura 9.

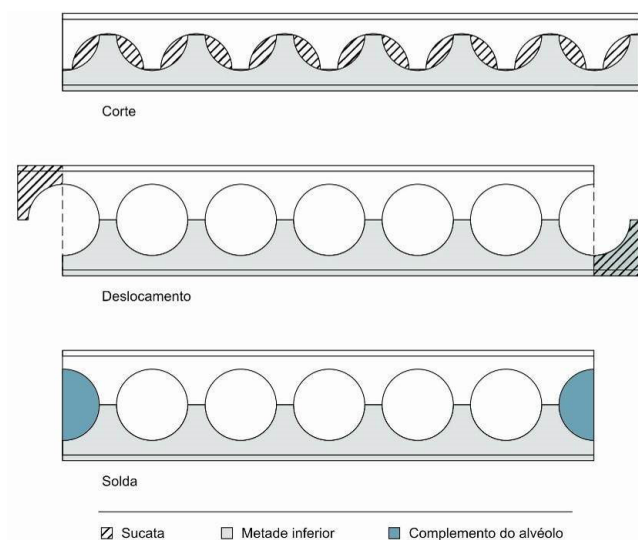


Figura 9 – Viga celular com eixo reto.

1.6.2 Viga celular com eixo curvo

Em resumo, curvaturas em vigas celulares podem ser necessárias por dois motivos, exigência arquitetônica de elementos de cobertura ou compensação da flecha devido às ações permanentes, podendo ser obtidas de duas maneiras:

- a) A partir da fabricação de uma viga reta e, posteriormente, e aplicação de contraflecha, desde que o raio elástico mínimo não seja ultrapassado (um procedimento prático para estimar esse raio é proposto em 3.1.4.8);
- b) A partir do corte de dois perfis originais com alvéolos (ou células) de tamanhos ligeiramente diferentes, como exibido na Figura 10.

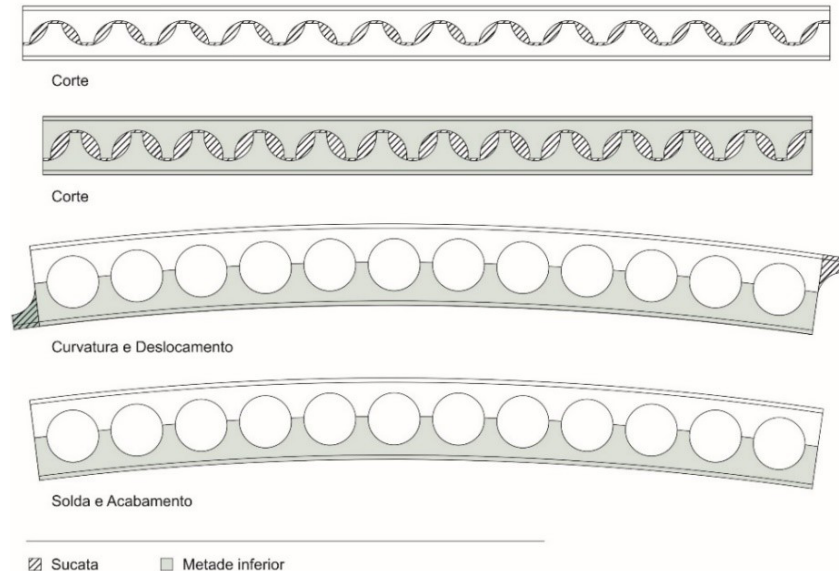


Figura 10 – Obtenção de vigas celulares com eixos curvos.

No caso do corte de dois perfis com alvéolos diferentes, opção (b), 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, é necessário considerar, em cada um dos perfis, o raio de curvatura da viga celular, como também 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. Conhecendo-se o raio (R) e o vão (L), pode-se determinar a flecha (δ) por meio da Eq.(1).

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

1.6.3 Viga celular com altura variável

A configuração de vigas celulares com altura variável é interessante para estruturas solicitadas com grandes momentos fletores em uma de suas extremidades, como coberturas em balanço e coberturas de galpões. A partir de um ajuste no alinhamento do traçado do corte, que faça um pequeno ângulo com o eixo do perfil original, é possível fabricar uma viga celular de altura / inércia variável, como ilustrado na Figura 11.

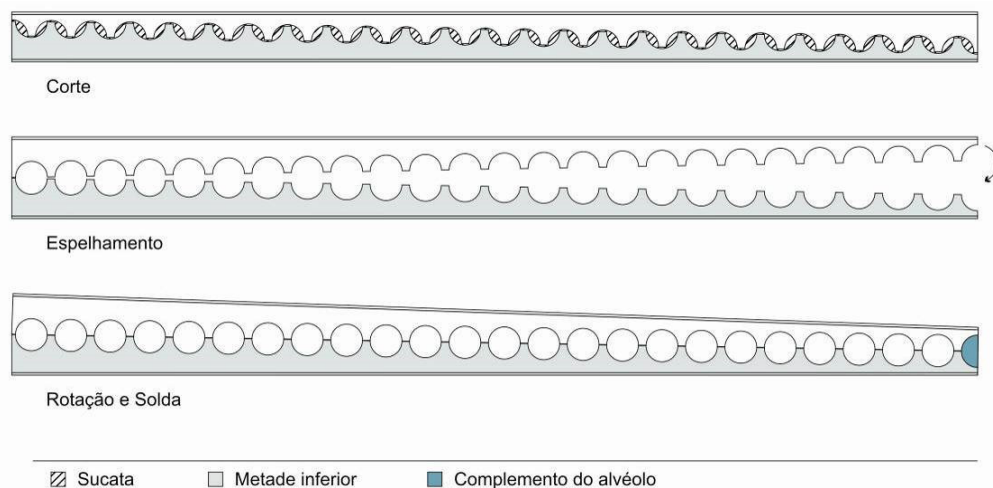


Figura 11 – Obtenção de vigas celulares com inércia variável.

1.6.4 Vigas celulares com seções assimétricas

Em sistemas de piso misto, pode ser interessante utilizar vigas celulares com seção assimétrica, economizando aço no banzo superior do perfil sem prejuízo ao desempenho estrutural. A assimetria referida aqui é uma monossimetria, ou seja, em relação ao eixo transversal ao plano da alma.

Em edifícios de múltiplos pavimentos feitos com estrutura de aço, o sistema de piso é geralmente composto por uma laje de concreto armado apoiada sobre uma grelha de vigas de aço. Se essa laje é simplesmente apoiada sobre as vigas, cada um dos elementos constituintes, laje e viga, trabalham independentemente à flexão. Portanto, a distribuição de tensões normais de flexão em cada elemento, em regime elástico, é igual àquela mostrada na Figura 12, onde f_c é a resistência à compressão do concreto e f_y a tensão de escoamento do aço do perfil.

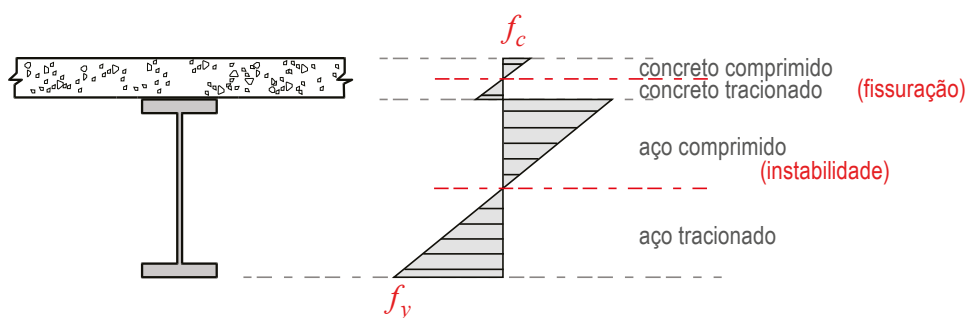


Figura 12 – Distribuição de tensões normais em regime elástico na laje de concreto e na viga de aço quando trabalham independentemente.

Para a configuração representada na Figura 12, existe uma linha neutra na laje de concreto e outra no perfil de aço, com uma parte comprimida e uma tracionada. Como a resistência à tração do concreto é muito baixa, despreza-se a contribuição da metade inferior da laje. A metade superior do perfil de aço, por sua vez, fica comprimida e, se as chapas da mesa e da alma possuírem esbelteza acima de um certo valor, a resistência da metade comprimida do perfil de aço pode ficar limitada pela possibilidade de instabilidade local das chapas.

Caso algum meio de conexão seja utilizado para conectar a laje ao perfil de aço, forma-se uma viga mista de aço e concreto. Nesta situação, observa-se uma seção única, composta por dois materiais distintos, e uma única linha neutra. Na situação ideal, em que a linha neutra está posicionada exatamente na interface entre a laje de concreto e o perfil de aço, tem-se a distribuição de tensões normais de flexão mostrada na Figura 13, admitindo-se regime elástico.

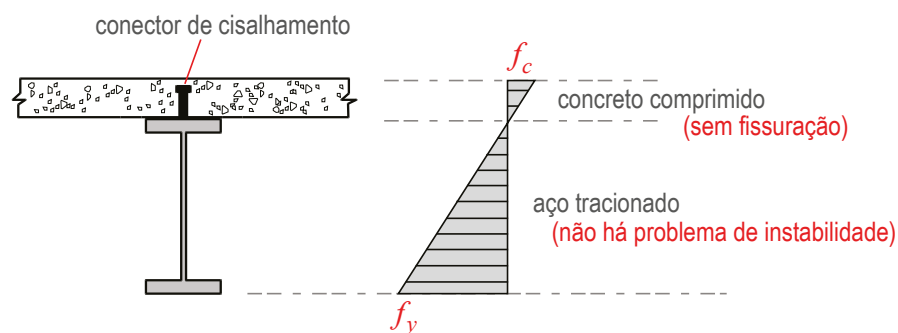


Figura 13 – Distribuição de tensões normais de flexão em regime elástico na laje de concreto e na viga de aço quando ambas trabalham solidárias na viga mista.

Para essa configuração, representada na Figura 13, a laje de concreto fica completamente comprimida, eliminando-se o problema do concreto tracionado. Além disso, pode-se contar com a contribuição da laje em toda a sua espessura, uma vez que o concreto estará sempre comprimido. Por sua vez, a seção do perfil de aço fica totalmente tracionada, eliminando-se o risco de instabilidade da mesa e da alma. Nessa situação, toda a seção de aço pode contribuir com sua capacidade máxima.

Na seção mista, as tensões na parte superior do perfil são menores que na parte inferior, devido à distribuição das tensões normais ao longo da altura. Por isso, é vantajoso usar um perfil monossimétrico, com menos aço no banzo superior (menos solicitado) e mais no banzo inferior (mais solicitado).

Tanto no caso de vigas de alma cheia soldadas como de vigas celulares, os perfis são montados a partir de partes que são soldadas, o que permite escolher as chapas que são empregadas em cada mesa da seção. Podendo-se, inclusive, adotar seções híbridas, com aços distintos em cada uma das metades (Figura 14).

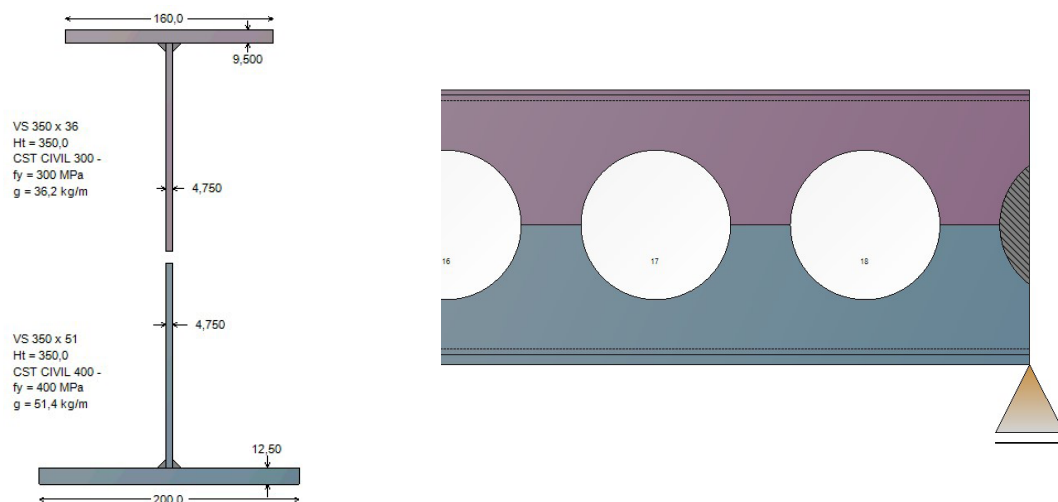


Figura 14 – Exemplo de uma seção monossimétrica híbrida para uma viga celular.

Por fim, no caso das vigas de alma cheia, geralmente modificam-se a mesa superior. No caso das vigas celulares, como normalmente a fabricação é realizada através de processos de corte e solda, torna-se viável fabricar um perfil monossimétrico utilizando-se metades de diferentes perfis originais (soldados ou laminados), dispondo um “tê” mais leve na parte superior e outro mais pesado na parte inferior (Pereira, 2022).

Referências

1. ArcelorMittal Europe – *Long products – Sections and Merchant Bars*. 2020.
2. 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.
3. Hechler, O.; Müller, C.; Sedlacek, G. *Investigations on beams with multiple regular web openings*, Architectural Engineering Conference. USA. 2006.
4. 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.
5. 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.
6. Oliveira, L.B. *Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2012.

2 Sobre o uso de vigas celulares

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 a exigências do partido arquitetônico – pela questão estética ou de extensão dos vãos.

De uma forma geral, as vigas celulares podem ser empregadas com vantagens tanto em sistemas de piso como em sistemas de cobertura de edificações com estrutura de aço.

No caso de estruturas de grandes vãos sujeitas a pequenas cargas, as vigas celulares são uma alternativa interessante por apresentarem maior rendimento estrutural em comparação com os perfis de alma cheia que as originam. Como explorado no tópico 1, a partir do 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 seu principal eixo, e isso tem consequências diretas na rigidez à flexão e na capacidade da viga ao momento fletor. Em supermercados e centros atacadistas, 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 sistemas de piso de estações rodoviárias e ferroviárias.

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.

2.1 Entendendo as vantagens do sistema

2.1.1 Aproveitamento do espaço construído e integração de instalações

Muitas vezes busca-se a redução da altura dos andares de um edifício e, conseqüentemente, de sua altura total, possibilitando:

- O 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;
- A redução do volume e da área total construída, o que resulta em menores custos de execução e, posteriormente, de operação e manutenção.

Com relação à integração de instalações, o uso de vigas celulares em sistemas de piso de edifício viabiliza uma melhor acomodação de instalações técnicas, como sistemas elétricos, hidráulicos, de ar-condicionado, dentre outros, conforme exibido na Figura 15.



Figura 15 – Whitehall Road, Leeds, Reino Unido.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)

A possibilidade de passar dutos e instalações através das aberturas é uma vantagem importante dessa solução, já que evitam aberturas que deveriam ser feitas nas almas de perfis de alma cheia, e previnem o aumento da altura total da construção, que ocorre quando os dutos passam sob as vigas.

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.

2.1.2 Maior flexibilidade e competitividade para o layout do pavimento

Além de permitir a passagem de instalações, as vigas celulares facilitam a criação de grandes espaços, com vãos que podem chegar, por exemplo, a 18 m em sistemas de piso de edifícios. Na Figura 16 é feita a comparação entre vãos vencidos por vigas celulares e vigas de alma cheia. Além dos vãos maiores reduzirem o número de pilares necessários, eles permitem maiores flexibilidades na definição do layout do ambiente construído.

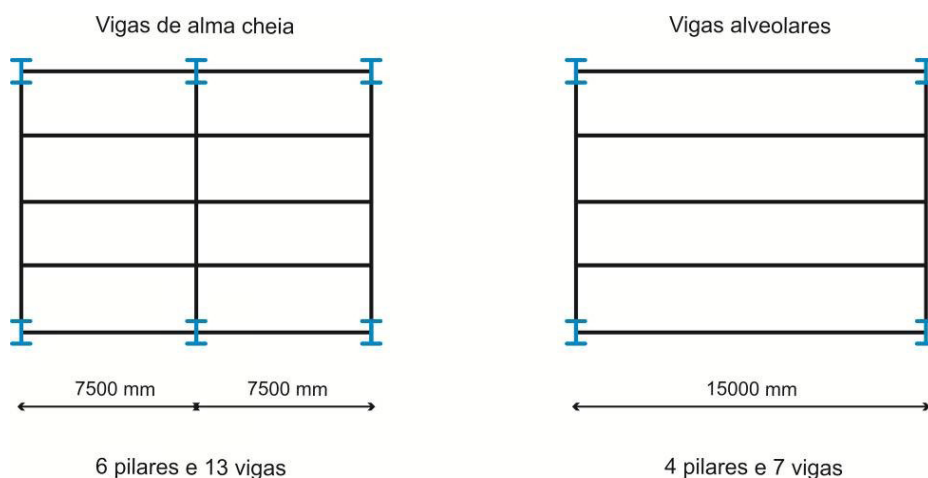


Figura 16 – Comparação entre pavimentos com viga de alma cheia e com viga celular.

Utilizando como base a comparação formulada pela CMC Steel, ilustrada na Figura 17, 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 de até 30% no custo da estrutura. Esse é aspecto importante que não pode deixar de ser considerado em análises da viabilidade do uso das vigas celulares, uma vez que, vãos maiores significam menos pilares e menos bases de fundação, o que gera, consequentemente, economia com materiais e mão de obra empregada para fabricação e execução.

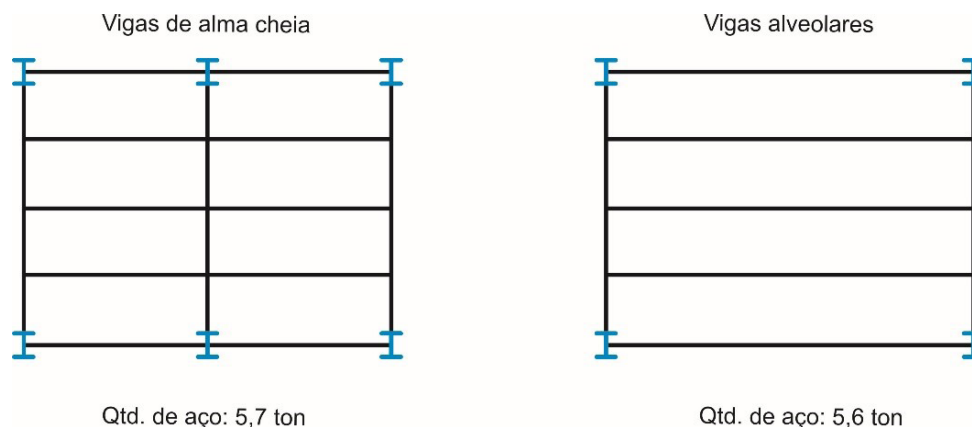


Figura 17 – Comparação do consumo de aço entre pavimentos com vigas de alma cheia e com vigas celulares.

2.1.3 Eficiência construtiva

O emprego de vigas celulares em um projeto, como alternativa aos perfis de alma cheia convencionais, pode resultar em economia e eficiência no processo construtivo.

Além de contribuírem para a redução do número de pilares – e, por consequência, dos pontos de fundação, conforme abordado no item 2.1.2 – os vãos longos também diminuem a quantidade de peças a serem montadas, o que resulta em menores custos de fabricação e montagem. Economias indiretas também podem ser alcançadas devido a um cronograma de construção mais curto, especialmente quando a montagem de estruturas metálicas estiver no caminho crítico do cronograma da obra. Por fim, e talvez mais importante, um cronograma de construção mais curto pode permitir ao proprietário o reconhecimento antecipado de receita.

2.1.4 Desempenho à vibração

Em teoria, as vibrações das estruturas podem ocasionar dois problemas: desconforto nas pessoas e ressonância, e um dos requisitos de um projeto estrutural é dimensionar a estrutura adequadamente de modo a evitar essas situações.

Estruturas de pisos com pouca massa e amortecimento reduzido podem estar sujeitas a vibrações mesmo durante atividades humanas rotineiras. Essas vibrações podem causar desconforto aos usuários ou comprometer o funcionamento adequado de equipamentos sensíveis.

Toda estrutura possui frequências naturais de vibração. De forma geral, a primeira frequência natural de um elemento estrutural, também chamada de frequência fundamental, pode ser estimada com a Eq. (2). De acordo com essa equação, a frequência de vibração é diretamente proporcional à rigidez do elemento e inversamente proporcional à sua massa.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{rigidez}}{\text{massa}}} \quad (2)$$

Quando uma estrutura é mobilizada por uma ação repetitiva, cuja frequência de repetição coincide com uma de suas frequências naturais, essa coincidência dá origem ao fenômeno denominado ressonância, palavra relacionada ao fato de um responder ao outro reciprocamente. Existem situações reais em que deliberadamente se produz uma frequência que causa ressonância, como, por exemplo, num balanço, em alguns instrumentos musicais, no rádio e no forno de micro-ondas.

A excitação da estrutura pode se dar a partir de várias e diferentes fontes, como, por exemplo, ação de pessoas (andar, correr, pular), movimento de máquinas, vento, terremotos, ondas sonoras, etc.

A vibração se torna um problema quando a resposta da estrutura se dá de maneira indesejável, podendo causar desconforto, percepção visual perturbadora, deslocamentos excessivos, tensões elevadas e fadiga do material. O problema da fadiga, em particular, está associado ao número de oscilações e à faixa na qual as tensões no material variam.

Observando a Eq. (2), pode-se deduzir que quanto menor for a rigidez de uma estrutura, menor será sua frequência de vibração. No tocante ao desconforto humano e ao risco de ressonância induzida por atividade humana, as frequências naturais baixas é que são problemáticas. Assim, quando se verifica que uma estrutura está com frequência natural baixa, a solução passa por tentar aumentar sua rigidez sem aumentar a massa.

Vigas celulares possuem seção transversal aproximadamente 1,5 vezes mais alta do que os perfis laminados de vigas com massa equivalente. Consequentemente, possuem maior momento de inércia e maior rigidez, apresentando um desempenho melhor à vibração em comparação com os perfis originais. Aumentando-se a rigidez da estrutura, aumentam as frequências naturais e, normalmente, isso viabiliza a solução dos problemas decorrentes dos efeitos da vibração em um sistema de piso ou cobertura.

2.2 Principais aplicações

2.2.1 Edifícios garagem

As vigas celulares são uma alternativa interessante também para edifícios destinados a estacionamento (Figura 18), 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, também possibilita a construção de painéis de piso com ligeiro caimento, facilitando a sua drenagem.



Figura 18 – Sistema de piso de um estacionamento com vigas celulares.
(Milton Keynes Car Park, Inglaterra – foto: Westok)

2.2.2 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 19).



Figura 19 – 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).

Para esses sistemas, o uso de vigas celulares é também vantajoso em relação às treliças, já que requerem menor tempo de fabricação por possuírem menos peças e pela possibilidade de serem transportadas para a obra já montadas, o que reduz gastos com mão de obra. Com elas, pode-se vencer vãos de até aproximadamente 40 m, que podem variar de acordo com o tipo utilizado: reta, curva ou de altura variável.

Usualmente utilizadas em sistemas de piso, as vigas celulares de eixo reto também são aplicadas com sucesso em sistemas de cobertura de galpões e ginásios cobertos, como exibidos nas Figuras 20 e 21.



Figura 20 – Cabines DIY Preston (21 m) e Piscina Fulham Broadway (26,5 m).
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)



Figura 21 – Centennial Park, Elstree (36 m) – Reino Unido.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)

As vigas de eixo curvo são comumente utilizadas em coberturas de ginásios esportivos, estações ferroviárias, concessionárias de automóveis, academias, supermercados, praças de alimentação e centros de convenções (Figuras 22 e 23). Em linhas gerais, quanto maior a extensão do vão a ser vencido, maior é a economia das vigas celulares com eixo curvo em relação às vigas de eixo reto.



Figura 22 – Academia Liverpool FC (44 m) e South Mimms Services – Reino Unido.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)



Figura 23 – Concessionária Audi UK
(foto: Westok).

As vigas celulares 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 de estádios esportivos (Figura 24) e podem possuir aberturas com diâmetro constante ou variável.



Figura 24 – Hull KC Stadium (29 m) e Harlequins Rugby Club (12 m) – Reino Unido.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)

2.2.3 Requalificação de edificações antigas

As vigas celulares também podem ser utilizadas na requalificação ou na modernização de edifícios antigos, em casos em que se pretende preservar o patrimônio arquitetônico. Nessas situações, as vigas celulares proporcionam leveza visual e provocam uma interferência menos brusca entre a estrutura nova e a antiga.

Na Figura 25 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.

O piso R+1, indicado no desenho mostrado na Figura 25, 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.

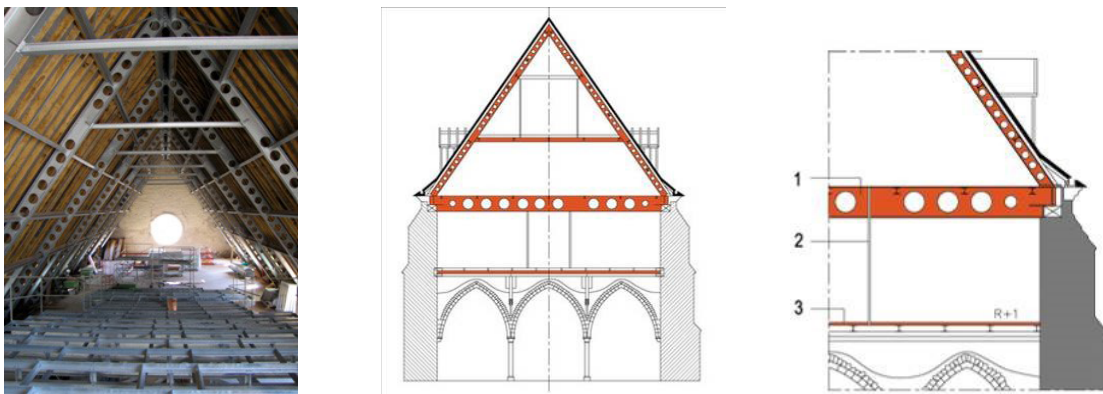


Figura 25 – Elevação do edifício principal e detalhes do apoio da nova estrutura.
(fonte: www.constructalia.com – acessado em 13/12/2011)

O uso das vigas celulares na laje e na estrutura do convento permitiu solucionar a passagem dos dutos de instalações. Além disso, a regularidade das aberturas possibilita acrescentar novas instalações se necessário.

Neste caso, o uso das vigas celulares foi fundamental para alcançar o desempenho estrutural e arquitetônico esperado no processo de readequação do edifício histórico.

Referências

1. 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.
2. Oliveira, L.B. *Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
3. ARCELORMITTAL: Catálogo – *Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars*. ACB® Vigas Alveolares. Disponível em: <www.arcelormittal.com/sections> acessado em 04/10/2011.
4. Murray, T.M.; Allen, D.E.; Ungar, E.E. *Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity*. Steel Design Guide #11. American Institute of Steel Construction, 2016.
5. Fares, S.S.; Coulson, J.; Dinehart, D.W. *Castellated and Cellular Beam Desing*. Steel Design Guide #31. American Institute of Steel Construction, 2016.

3 Projeto de vigas celulares

3.1 Critérios para projeto

3.1.1 Tamanho e espaçamento dos alvéolos

Ao contrário das vigas casteladas, o corte para produzir vigas celulares não exige simetria entre a largura do montante e o comprimento horizontal do alvéolo, permitindo flexibilidade para ajustar o espaçamento entre aberturas, independentemente do diâmetro. Na Figura 26, estão expressas as faixas de variação sugeridas tanto para o diâmetro das aberturas, como para o passo da viga celular.

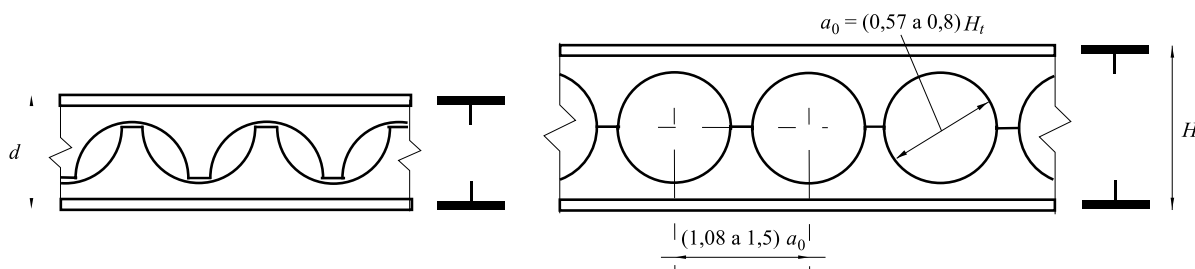


Figura 26 – Corte das vigas celulares e faixas de variação do passo e do diâmetro das aberturas.

A possibilidade de variar o tamanho e o espaçamento das aberturas, traz algumas vantagens interessantes para as vigas celulares, como:

- Maior flexibilidade para sua aplicação, permitindo configurar vigas com geometria mais apropriada para coberturas ou para sistemas de piso;
- Possibilidade de definição de posição das aberturas, resultando em maior liberdade de projeto, reduzindo os detalhes associados às 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 (H_t) e o peso final da viga celular;
- A relação entre o carregamento e o peso final 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.

3.1.2 Considerações sobre a razão de expansão da viga celular

Neste manual, a ArcelorMittal traz sugestões de razões de expansão (k) para sistemas de cobertura e para sistemas de piso, sendo k a relação entre a altura total do perfil expandido e a altura total do perfil original. Além disso, também apresenta relações a_0/d e e/a_0 sugeridas a cada um desses sistemas (Tabela 1).

Tabela 1 – Razões de expansão k 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

Oliveira (2012) verificou que algumas combinações entre as razões de expansão e as relações a_0/d e e/a_0 podem levar a conflitos geométricos, como exemplificado na Figura 27, resultando em configurações cuja fabricação seria inviável.

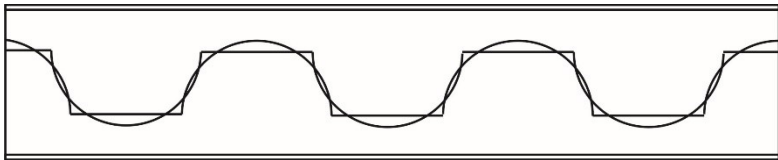


Figura 27 – Exemplo de um caso inviável sob o ponto de vista da fabricação.

Outras combinações, como a da Figura 28, são fabricáveis, mas podem gerar maior perda de aço conforme os parâmetros de corte da viga.

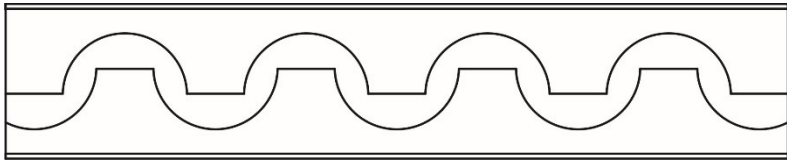
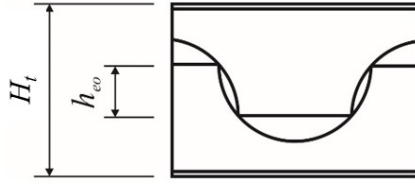


Figura 28 – Exemplo de um caso com perda maior de aço na fabricação.

Para assegurar que as combinações de k , a_0/d e e/a_0 sejam fabricáveis, aplica-se o raciocínio a seguir.

Na Figura 29 estão indicadas as dimensões de h_{e0} e H_t . A variável h_{e0} representa uma condição ótima para o traçado das duas metades da viga celular no perfil de alma cheia, sendo d a altura total do perfil original e H_t a altura total do perfil expandido.



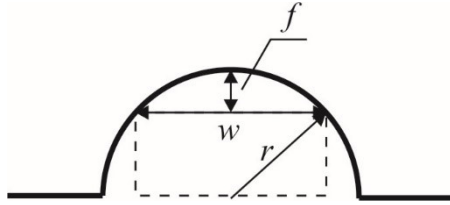
$$H_t = d + h_{e0} = kd \quad (3)$$

$$h_{e0} = kd - d \quad (4)$$

$$h_{e0} = (k - 1) d \quad (5)$$

Figura 29 – Indicação de h_{e0} .

Na Figura 30 são ilustradas as posições consideradas para as variáveis f , w e r .



$$r = \frac{a_0}{2} \quad (6)$$

$$f = \frac{a_0}{2} - h_{e0} \quad (7)$$

$$w = e - a_0 \quad (8)$$

Figura 30 – Indicação de f , w e r .

A relação entre as variáveis da Figura 30 utilizadas nessa dedução é dada pela Eq. (9):

$$f = r - \frac{1}{2} \sqrt{4r^2 - w^2} \quad (9)$$

Substituindo as equações (6), (7) e (8) na Eq. (9), tem-se:

$$\frac{a_0}{2} - h_{e0} = \frac{a_0}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{4 \left(\frac{a_0}{2} \right)^2 - (e - a_0)^2} \quad (10)$$

Desenvolvendo a Eq. (10), obtém-se:

$$h_{e0} = \frac{a_0}{2} \sqrt{\left(\frac{2e}{a_0} - \frac{e^2}{a_0^2} \right)} \quad (11)$$

Para simplificação das expressões, foram consideradas as seguintes variáveis:

$$\eta = \frac{e}{a_0} \quad (12)$$

$$\rho = \sqrt{2\eta - \eta^2} \quad (13)$$

$$\mu = \frac{a_0}{d} \quad (14)$$

Aplicando (5) em (11), tem-se:

$$(k - 1) d = \frac{a_0}{2} \sqrt{\left(\frac{2e}{a_0} - \frac{e^2}{a_0^2} \right)} \quad (15)$$

Substituindo (12), (13) e (14) em (15), obtém-se:

$$k - 1 = \frac{\mu \rho}{2} \quad (16)$$

Resolvendo a Eq. (16) para k , μ e ρ , tem-se os seguintes valores limites:

$$k = \frac{\mu \rho}{2} + 1 \quad (17)$$

$$\mu = \frac{2(k-1)}{\rho} \quad (18)$$

$$\rho = \frac{2(k-1)}{\mu} \quad (19)$$

Considerando que as variáveis μ e ρ estão apenas em função dos parâmetros a_0 , d e e , as relações descritas acima podem ser implementadas numa planilha ou programa computacional, facilitando a verificação dos critérios e procedimentos para pré-dimensionamento propostos.

3.1.3 Comprimento de projeto

Para o cálculo de vigas de aço de alma cheia, é prática comum considerar o comprimento teórico da viga como a distância entre os eixos dos apoios. Esse procedimento pode ser empregado porque quando o fabricante da estrutura define o comprimento de projeto da viga, pode ajustar a posição da ligação na extremidade sem originar um conflito com qualquer outro elemento. No caso das vigas celulares, entretanto, esse procedimento pode gerar um conflito entre a ligação e o montante extremo, ou até mesmo com a abertura extrema. Por essa razão, é razoável considerar como vão da viga a distância entre os centroides das ligações nas extremidades. Fazendo isso, preserva-se espaço nos montantes extremos para a execução das ligações, sem conflitos.

Note-se que, para admitir o centroide da ligação, é necessário ter uma estimativa prévia da ligação. Isso pode ser feito a partir das reações de apoio da viga. Conhecendo o carregamento de cálculo é possível obter as reações de apoio e, a partir delas, estimar a configuração da ligação (largura da chapa ou cantoneira de ligação, número de linhas de parafusos etc.). Para isso, é útil lançar mão de ferramentas como tabelas, planilhas ou softwares para o cálculo de ligações de vigas.

Caso não seja possível ou conveniente estimar a geometria da ligação durante o dimensionamento da viga celular, pode-se posteriormente preencher as aberturas extremas, disponibilizando mais espaço na alma para a execução das ligações, conforme exibido no tópico 3.2.1.

No caso de uma viga apoiada sobre outra viga ou sobre um pilar, pode-se tomar o vão de cálculo como a distância entre enrijecedores de apoio.

3.1.4 Definição geométrica inicial das vigas celulares

Na viga de alma cheia, a resistência ao momento fletor é determinada principalmente pelo módulo resistente elástico (W_x) ou plástico (Z_x) do perfil. Se o perfil analisado não satisfizer o critério $S_d/R_d \leq 1,0$, utiliza-se um perfil maior, o que geralmente aumenta a capacidade da viga.

Para as vigas celulares, a capacidade resistente da viga está relacionada a um conjunto de fenômenos e relações geométricas. Há modos de falha possíveis relacionados a M , V , N , $M+N$, $M+V$, $M+N+V$, FMA etc. A capacidade última da viga depende das relações a_o/H_t , e/a_o , d/b_f , L/d etc. Além disso, algumas variações dessas relações são ambíguas. Por exemplo, para uma determinada situação, reduzir o diâmetro das aberturas (a_o) pode melhorar a capacidade da viga; para outra, reduzir a_o pode piorar a capacidade da viga (porque pode comprometer a esbeltez da alma apoiada e livre no entorno da abertura).

O sucesso no dimensionamento de uma viga celular depende da habilidade do calculista em avaliar as taxas de solicitação para diferentes critérios de falha e identificar quais parâmetros da viga ajustar. Uma ferramenta computacional é muito útil devido à complexidade do processo. No item 5.4 são apresentadas diretrizes para auxiliar o engenheiro nessa tarefa.

3.1.4.1 Vão de projeto (L_v)

Os parâmetros geométricos da viga são estabelecidos em função do vão de projeto (L_v). Ver a Figura 33 e a Figura 34.

3.1.4.2 Razão de expansão (k)

As vigas celulares diferem das casteladas por permitirem flexibilidade na escolha dos valores da largura do montante e do diâmetro das aberturas. As relações k , a_o/d e e/a_o propostas pela ArcelorMittal para sistemas de piso e para sistemas de cobertura são apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2 – Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de piso.

Sistemas de Piso							
k	1,3				1,4		
a_o/d	0,8	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1
e/a_o	1,2 a 1,6	1,2 a 1,7			1,2 a 1,4	1,2 a 1,6	

Tabela 3 – Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de cobertura.

Sistemas de Cobertura								
k	1,4				1,5			1,6
a_0/d	1,0	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,3
e/a_0	1,1 a 1,3				1,1 a 1,3			1,1 a 1,3

3.1.4.3 Altura do perfil original (d) e altura do perfil celular (H_t)

Para a determinação da altura do perfil original (d) é necessário primeiramente estimar a altura do perfil expandido final que formará a viga celular (H_t). Essa altura deve ser estimada em função do vão do projeto, considerando dois critérios distintos, um para vigas de eixo reto (Figura 63) e um para vigas de eixo curvo (Figura 64).

Caso o valor obtido de d não coincida com uma das alturas disponíveis no mercado, adota-se a altura mais próxima. Se o perfil celular for fabricado como perfil soldado, pode-se adotar o valor de d calculado.

3.1.4.4 Seção monossimétrica

Para projetar uma viga celular com perfil monossimétrico, utilizando as metades de diferentes geometrias de perfis originais, devem ser observadas as seguintes condições:

- a altura dos perfis originais deve ser de pelo menos 140 mm;
- a razão entre as alturas dos dois perfis básicos não deve ser maior que 10;
- a razão entre as áreas das mesas não deve ser maior que 4,5: $(b_{fi} \cdot t_{fi}) \leq 4,5 (b_{fs} \cdot t_{fs})$, onde:

b_{fi} é a largura da mesa inferior;

t_{fi} é a espessura da mesa inferior;

b_{fs} é a largura da mesa superior;

t_{fs} é a espessura da mesa superior;

- $0,1 \leq \alpha_y \leq 0,9$, onde: $\alpha_y = \frac{I_{y,tc}}{I_y}$

$I_{y,tc}$ é o momento de inércia da seção T comprimida (composta pela mesa comprimida e pela parte comprimida da alma), em relação ao eixo y (paralelo à alma);

I_y é o momento de inércia da seção inteira em relação ao eixo fraco (eixo paralelo à alma).

3.1.4.5 Propriedades geométricas

Com base na altura do perfil original (d), definem-se os parâmetros geométricos da viga, tais como o passo (e), o diâmetro das células (a_0) e a largura do montante (w). A Figura 31 ilustra os parâmetros geométricos gerais para as vigas celulares adequadas para sistemas de piso.

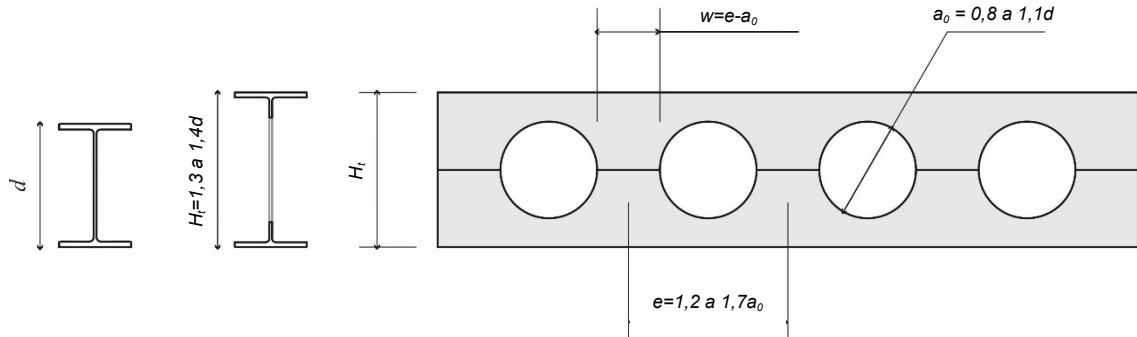


Figura 31 – Parâmetros geométricos da viga celular recomendados para sistemas de piso.

Na Figura 32 são ilustrados os parâmetros geométricos gerais para as vigas celulares adequadas para sistemas de cobertura.

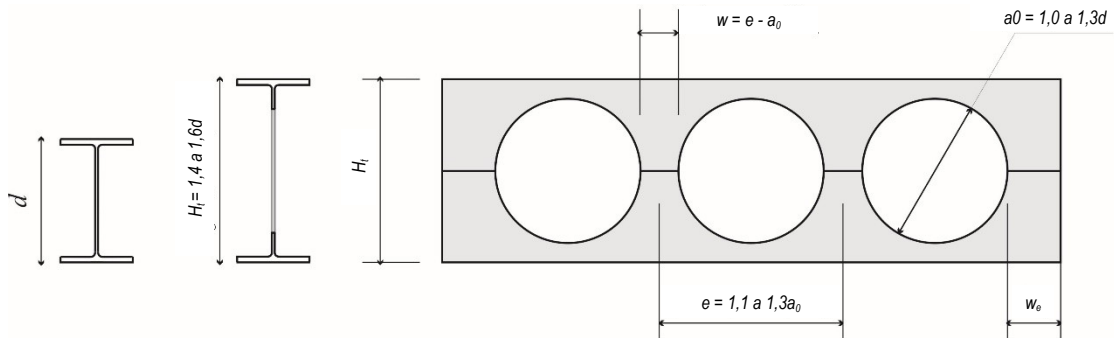


Figura 32 – Parâmetros geométricos de vigas celulares recomendados para sistemas de cobertura.

Apesar de os critérios para a definição dos parâmetros geométricos de vigas celulares serem diferentes para sistemas de piso e de cobertura, para ambos devem ser observados os limites geométricos para a largura dos montantes (w). Os limites sugeridos são:

$$w_{\min} \geq \begin{cases} \frac{a_0}{12} \\ 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (20)$$

$$w_{\max} \leq \frac{a_0}{1,25} \quad (21)$$

Além disso, a largura mínima do montante de extremidade ($w_{e,\min}$) deve atender à seguinte relação:

$$w_{e,\min} \geq e - \frac{a_0}{2} \quad (22)$$

Tendo sido definida a largura mínima do montante de extremidade ($w_{e,min}$), pode-se calcular o comprimento útil no qual serão distribuídas as aberturas (L_d).

$$L_d \leq L_v - 2 \left(w_{e,min} - \frac{b_w}{2} \right) \quad (23)$$

Em seguida calcula-se o número de aberturas, n , em função dos valores de L_d e do passo (e), sendo n arredondado para o número inteiro inferior mais próximo.

$$n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{e} \right) \quad (24)$$

A distribuição das aberturas ao longo do comprimento útil, L_d , inicia-se no centro do vão. Quando n for par, o centro da viga coincidirá com o centro de um montante (Figura 33), e quando n ímpar, coincidirá com o centro de uma abertura (Figura 34).

Com esta proposta, a posição das aberturas na viga será sempre simétrica, o que é interessante sob o ponto de vista do projeto arquitetônico.

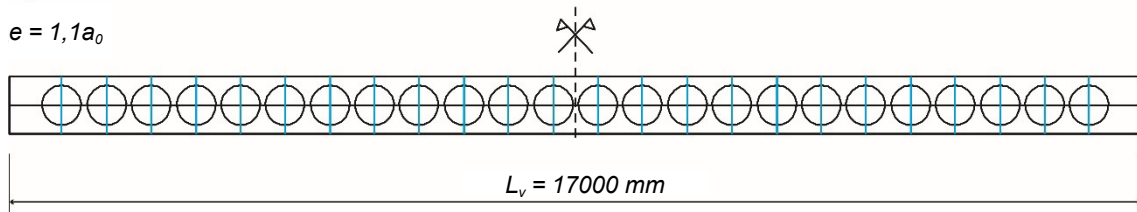


Figura 33 – Viga celular com número par de aberturas: montante no centro da viga.

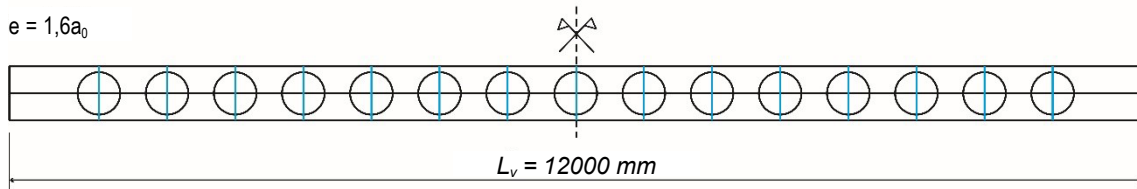


Figura 34 – Viga celular com número ímpar de aberturas: abertura no centro da viga.

Devido ao arredondamento do número de aberturas, e à distribuição destas ao longo do vão L_d , a largura final do montante de extremidade pode não ser igual a $w_{e,min}$. Dessa forma, pode-se calcular a largura final do montante de extremidade (w_e) por meio da seguinte expressão:

$$w_e = \frac{L_v - n \cdot e}{2} + w_{e,min} - \frac{w}{2} \quad (25)$$

3.1.4.6 Comprimento do perfil para corte (L_c)

Após a distribuição das aberturas em L_d , é possível definir o traçado do corte no perfil original para obtenção da viga celular. Pode-se, então, virtualmente, manter a metade inferior da viga e deslocar a metade superior até que os montantes se alinhem.

Em função do deslocamento de meio passo, é possível prever o comprimento do perfil original necessário para o corte adequado e a montagem final da viga celular. O comprimento de corte do perfil original é dado por:

$$L_c = L_v + \frac{e}{2} \quad (26)$$

A relação L_c/L_v fornece o valor em porcentagem, de quanto o perfil original precisará ser maior do que o vão de projeto para a obtenção da configuração final da viga.

3.1.4.7 Configuração final da viga

Para finalização da fabricação, os espaços resultantes nas extremidades da viga são preenchidos com chapas de aço conforme representado na Figura 35.

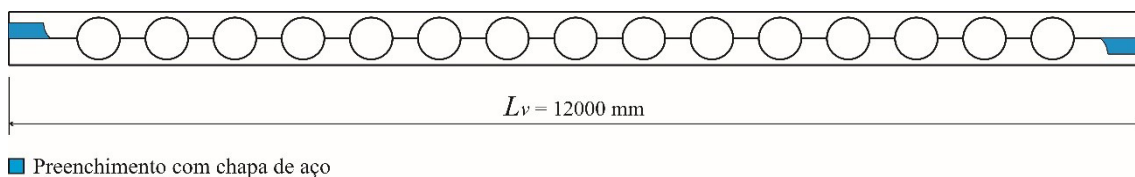


Figura 35 – Configuração final da viga celular.

Nos casos em que a largura do montante de extremidade w_e apresenta o mesmo valor da largura dos montantes intermediários w , não há área a ser aparada e, portanto, não há área a ser preenchida com chapa de aço.

3.1.4.8 Pré-dimensionamento do raio de curvatura no caso de perfis curvos

A forma em arco melhora o desempenho estrutural da viga celular, pois proporciona um caminho mais favorável para as forças ou tensões. Por essa razão, as relações geométricas admitidas para o pré-dimensionamento de vigas celulares em arco diferem daquelas para vigas de eixo reto.

Para o caso de vigas celulares fabricadas retas e posteriormente encurvadas por meio de uma contraflecha, deve-se respeitar o raio elástico mínimo. Um procedimento de pré-dimensionamento para vigas celulares curvas é apresentado no item 5.3.

3.2 Detalhes construtivos adicionais

Algumas situações em que as vigas celulares são aplicadas exigem soluções específicas quanto à disposição das aberturas e dos montantes. Nos subitens desta seção são apresentadas as soluções mais usuais.

Os detalhes construtivos estão diretamente relacionados às decisões de projeto e dependem em grande parte do cálculo estrutural de cada viga. As soluções são muito específicas para cada caso e devem ser analisadas de modo a garantir um custo competitivo e, principalmente, a exequibilidade do detalhe.

3.2.1 Aberturas preenchidas

Em alguns casos, devido à magnitude da força cortante na região próxima aos apoios, ou por outro requisito de dimensionamento, como no caso de incêndio, pode ser necessário realizar o fechamento completo de algumas aberturas, preenchendo-as com uma chapa compatível com a alma do perfil (Figura 36).



Figura 36 – Abertura preenchida
(fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 13/12/2011).

Há casos em que não é necessário preencher totalmente a abertura (Figura 37). Essa solução é geralmente utilizada para propiciar condições de ligação entre vigas principais e secundárias. O fechamento parcial da abertura para facilitar ligações é mais simples e econômico do que o fechamento total.

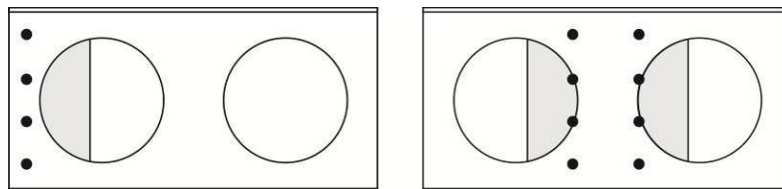


Figura 37 – Fechamento parcial das aberturas.

É possível definir, na fase de projeto, o passo (distância entre aberturas) e o espaçamento entre as aberturas de extremidade em relação aos apoios da viga. Essa flexibilidade permite adequar a posição dos montantes e das aberturas em função da necessidade de ligações intermediárias, ocasionada pelo encontro entre duas vigas.

3.2.2 Reforço das aberturas

Há casos em que, devido à magnitude da força cortante na região próxima aos apoios, faz-se necessário reforçar as aberturas, mas, por algum requisito de projeto, não é possível fechá-las, como descrito em 3.2.1. Nessas situações, pode-se reforçar a abertura introduzindo um enrijecedor em forma de anel, soldado ao longo do contorno da abertura para aumentar a sua rigidez (Figura 38).

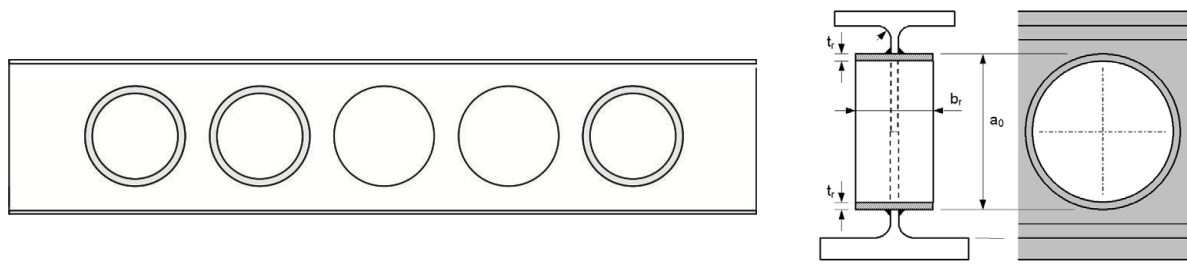


Figura 38 – Reforço com enrijecedor de anel soldado na borda da abertura.

3.2.3 Enrijecimento do montante

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 39a), ou a instalação de segmentos de anéis como enrijecedores aplicados na borda das aberturas (Figura 39b), são alternativas eficazes para estabilização do montante de alma (Oliveira, 2012).

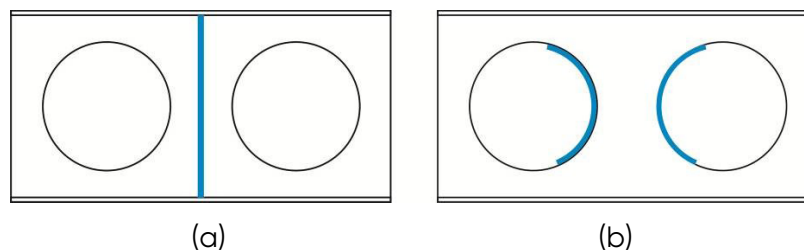


Figura 39 – Enrijecedores no montante e nas aberturas.

3.2.4 Alongamento de abertura para passagem de tubulação

Em alguns casos pode ser útil eliminar o montante entre duas aberturas, para viabilizar a passagem de tubulações de maiores dimensões. Essa solução pode ser prevista e resolvida ainda na fase de projeto, proporcionando agilidade na instalação dos dutos de serviços (Figura 40).

Na medida do possível, deve-se eliminar o montante entre duas aberturas na região mais próxima do meio do vão, região em que o perfil geralmente está sujeito a menores esforços de cisalhamento. Quando não é possível alocar a abertura alongada na região central do vão, e esta fica, portanto, mais próxima dos apoios da viga, pode ser necessário acrescentar algum reforço nessa região.



Figura 40 – Alongamento da abertura para passagem de tubulação.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011)

3.2.5 Ligações rígidas nas extremidades da viga celular

Em casos especiais de pórticos que suportam coberturas com grandes vãos, pode ser interessante utilizar vigas celulares ligadas rigidamente a perfis de alma cheia de inércia variável, um em cada extremidade da viga, como mostrado na Figura 41. Esse artifício favorece a redistribuição de momentos fletores, possibilitando à viga celular vencer um vão maior do que quando está apenas apoiada nas extremidades.



Figura 41 – Viga celular rigidamente ligada a perfis de alma cheia nas extremidades
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

3.3 Outras considerações

3.3.1 Cargas concentradas

Eventualmente, vigas podem receber cargas concentradas em diferentes posições, como:

- reações de apoio de outras vigas que se apoiam nelas;
- peças que se apoiam sobre a mesa superior da viga (comprimindo a alma);
- peças que ficam penduradas na mesa inferior da viga (tracionando a alma).

3.3.1.1 Cargas concentradas comprimindo a alma

Quando uma força concentrada atua sobre a mesa superior de um perfil I, comprimindo a alma, podem ocorrer quatro fenômenos: escoamento local da alma, enrugamento da alma, flambagem lateral da alma e flambagem da alma por compressão (ver Fakury et al., 2016).

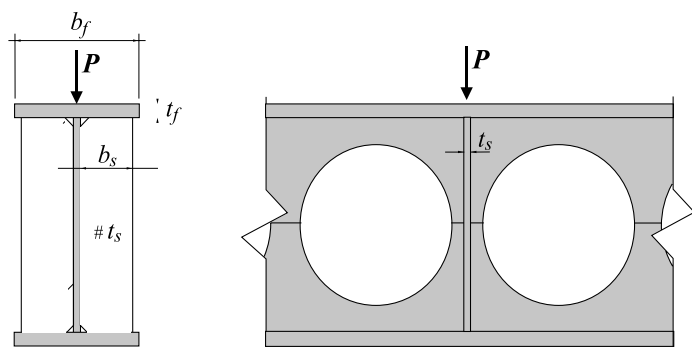
A NBR 8800 (ABNT, 2024) fornece métodos para verificar se uma viga de alma cheia resiste a cada um desses modos de falha citados. Caso a viga em questão não atenda à capacidade resistente requerida, pode-se:

- Escolher um perfil com maior espessura de alma;
- Escolher um aço com maior resistência ao escoamento;
- Usar enrijecedores transversais na seção em que a força localizada atua.

No caso de vigas celulares, além das 3 alternativas acima, pode-se preencher as aberturas na região da força concentrada e, ainda, acrescentar enrijecedores transversais na alma, na linha de atuação da força.

Se forem instalados enrijecedores transversais, recomenda-se soldá-los em ambos os lados da alma, conforme os seguintes requisitos (ver Figura 42):

- Os enrijecedores devem se estender por toda a altura da alma e ser soldados às mesas e à alma;
- A largura de cada enrijecedor, somada à metade da espessura da alma da viga, não pode ser menor que 1/3 da largura da mesa que recebe a força concentrada Eq. (27);
- A espessura de um enrijecedor não pode ser menor do que a metade da espessura da mesa da viga que recebe a força localizada e, ainda, deve atender à esbeltez máxima especificada na Eq. (28), na qual f_{ys} é a tensão de escoamento do aço do enrijecedor.



$$b_s + \frac{t_w}{2} \geq \frac{b_f}{3} \quad (27)$$

$$t_s \geq \begin{cases} \frac{t_f}{2} \\ \frac{b_s}{0,56\sqrt{E_a/f_{y,s}}} \end{cases} \quad (28)$$

Figura 42 – Enrijecedores sob forças concentradas comprimindo a alma.

Quando a linha de ação da força concentrada passa dentro de uma abertura, é necessário preenchê-la total ou parcialmente, como mostrado na Figura 43, para que o enrijecedor possa ser soldado em toda a altura da alma.

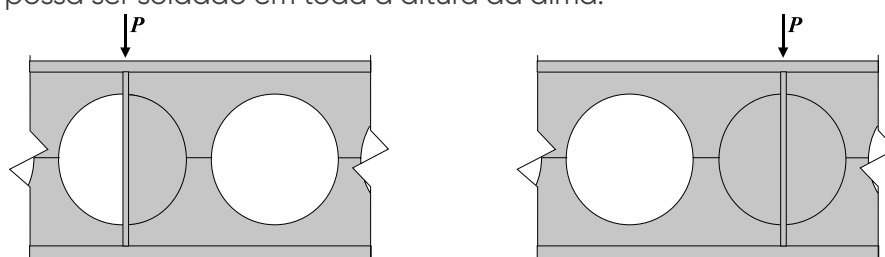


Figura 43 – Enrijecedores de alma sob força concentrada atuando sobre uma abertura.

Quando o montante de alma é robusto e não corre risco de instabilidade, a alma pode sofrer plastificação localizada junto a uma abertura qualquer. Normalmente isso ocorre no entorno de aberturas isoladas próximas a forças concentradas, ou junto a seções submetidas a solicitações máximas. Nesses casos, pode-se reforçar a alma, instalando-se enrijecedores horizontais acima e abaixo da abertura, como mostrado na Figura 44.

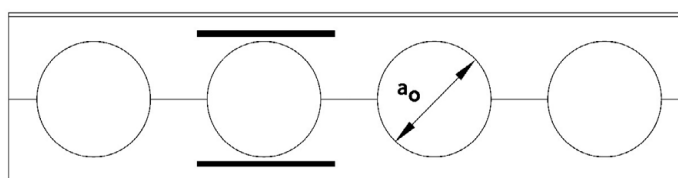


Figura 44 – Disposição de enrijecedores de alma para evitar plastificação localizada no entorno de uma abertura.

3.3.1.2 Cargas concentradas tracionando a alma

Quando uma força concentrada atua diretamente na mesa de um perfil I tracionando a alma, dois modos de falha podem ocorrer: *flexão local da mesa* na qual a força atua (Figura 45a), caso essa força tenha um comprimento de atuação b_a igual ou superior a $0,15b_f$ e *escoamento local da alma* (Figura 45b).

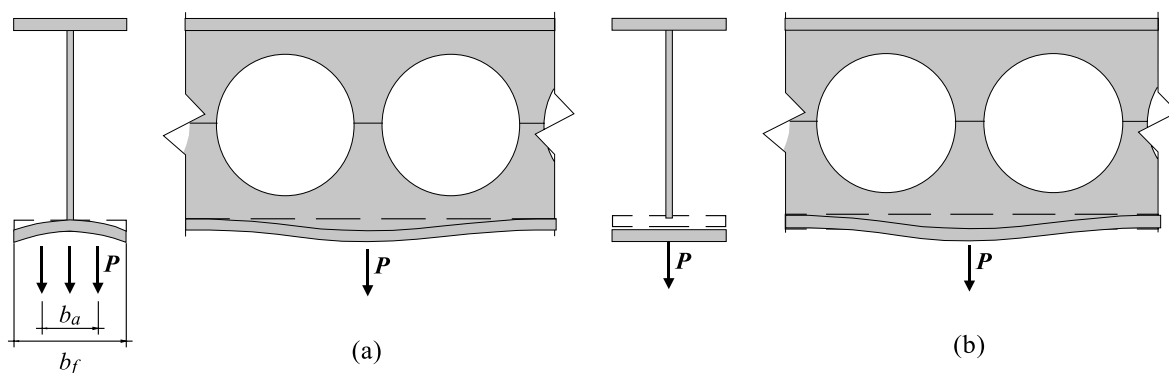


Figura 45 – Estados-límites últimos causados por forças concentradas tracionando a alma.

A NBR 8800 (ABNT, 2024) fornece métodos para verificar se a viga resiste aos dois estados-límites citados. Caso não resista, a alma deve ter sua espessura aumentada ou devem-se empregar enrijecedores transversais para aumentar a capacidade resistente. Recomenda-se o uso de enrijecedores sempre que houver força localizada na mesa do perfil tracionando a alma. Os enrijecedores tracionados devem atender às mesmas condições dos enrijecedores comprimidos, com exceção do fato de poderem se estender pelo menos até à metade da altura da alma (Figura 46).

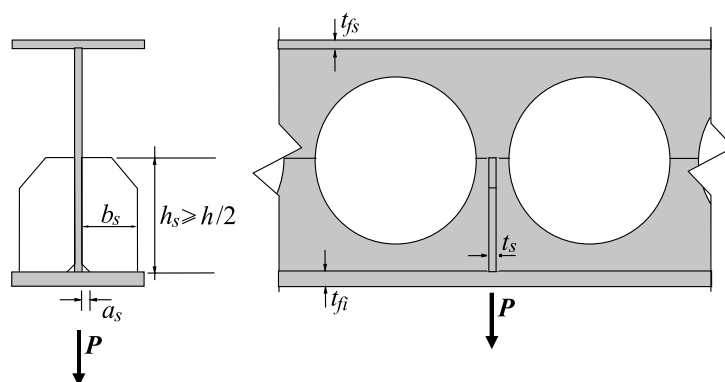


Figura 46 – Enrijecedores na seção em que atua força concentrada tracionando a alma.

Para enrijecedores transversais necessários para resistir a forças localizadas que produzam tração na alma, a NBR 8800 (ABNT, 2024) prescreve que a solda entre o enrijecedor e a mesa carregada deve ser capaz de suportar a diferença entre a força solicitante e a força resistente de cálculo. Considera-se que a solda entre o enrijecedor e a alma seja capaz de transferir para a alma essa diferença. Essa recomendação tem por fundamento o fato de que o perfil sozinho (sem enrijecedores) possui alguma resistência. A solda fica responsável por transferir apenas a diferença entre a força solicitante e a resistência do perfil sem enrijecedores. Ou seja, uma parte da resistência é fornecida pelo próprio perfil.

Os enrijecedores transversais previstos para resistir a uma força localizada tracionando a alma devem ser dimensionados como barras axialmente tracionadas. Para esse dimensionamento, deve-se tomar como área bruta a área total dos enrijecedores situados dos dois lados da alma (no plano perpendicular à força localizada) e a área desses enrijecedores ligada à mesa carregada como área líquida efetiva, descontando-se os

recortes que possam existir. Assim, observando-se a Figura 46, a área bruta é equivalente a $A_{g,s} = 2 b_s t_s$, e a área líquida efetiva é equivalente a $A_{e,s} = 2(b_s - a_s)t_s$.

3.3.2 Estabilidade na montagem

Deve-se dar atenção especial à movimentação de vigas celulares, sobretudo as de seção monossimétrica empregadas em pisos mistos, pois a zona comprimida mais esbelta aumenta sua suscetibilidade à flambagem lateral com torção (FLT).

Após a instalação do perfil de aço e o endurecimento do concreto, a laje oferece contenção lateral contínua, prevenindo a FLT. Entretanto, durante o transporte ou logo após a montagem, o perfil pode flambar sob o próprio peso. Assim, é essencial adotar cuidados específicos no dimensionamento, transporte e montagem.

3.3.3 Resistência a fogo

3.3.3.1 Generalidades

A verificação de uma viga celular em situação de incêndio deve seguir as recomendações da NBR 14323 (ABNT, 2013), norma brasileira que estabelece os requisitos mínimos para o projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. A NBR 14323 (ABNT, 2013) é fundamentada em pesquisas e nas normas europeias EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005, com ajustes para compatibilização com a NBR 8800 (ABNT, 2024).

3.3.3.2 Comportamento estrutural do aço em temperatura elevada

O aumento da temperatura do aço em situação de incêndio ocasiona a degradação de suas propriedades mecânicas, principalmente da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade. A NBR 14323 (ABNT, 2013) apresenta fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço em função da temperatura. Entretanto, a determinação desses fatores depende de se conhecer a temperatura no aço após um determinado tempo de incêndio. Para isso, é necessário determinar o TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo) de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001).

Na Figura 47, são mostradas curvas representativas do decaimento do fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada ($k_{y,\theta}$ e $k_{\sigma\theta}$) em relação ao valor à temperatura ambiente.

Na Figura 48, são mostradas curvas representativas do decaimento do fator de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil em temperatura elevada ($k_{E,\theta}$) em relação ao valor à temperatura ambiente.

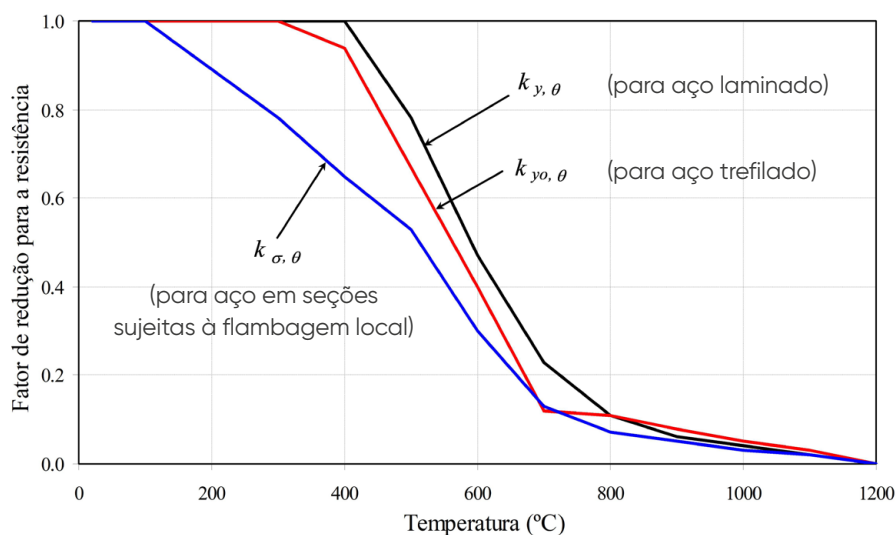


Figura 47 – Degradação do limite de resistência do aço com a temperatura.

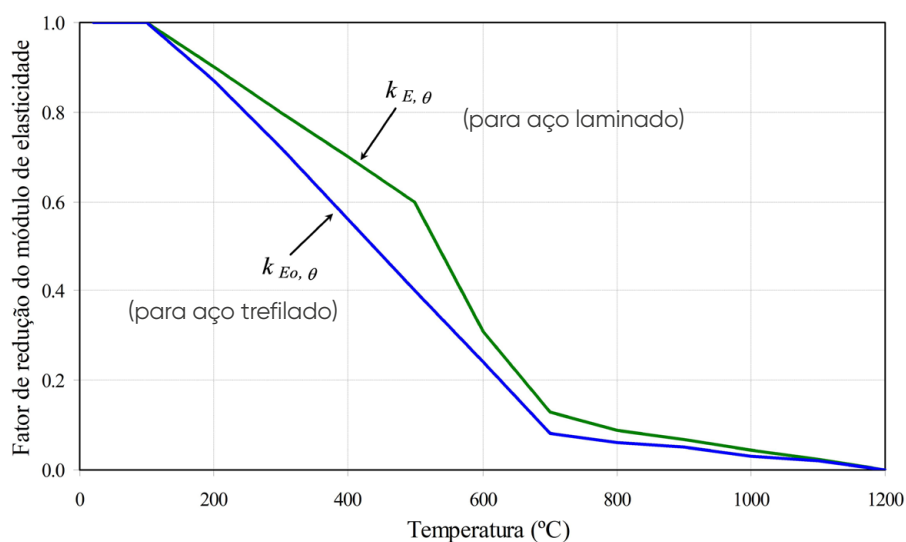


Figura 48 – Degradação do módulo de elasticidade do aço com a temperatura.

3.3.3.3 *Análise térmica para determinação da temperatura no aço*

Para verificar um elemento de aço em incêndio, é preciso primeiro realizar uma análise térmica para determinar sua temperatura no tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001).

O calor é uma forma de energia em trânsito e transfere-se de um meio a outro por três processos: condução, convecção e radiação. Em um elemento estrutural de aço exposto a um incêndio, os gases quentes aquecem o aço por esses três processos. Modelos matemáticos permitem calcular o calor absorvido e estimar a temperatura do aço.

A NBR 14432 (ABNT, 2001) apresenta uma curva padrão de incêndio que relaciona a temperatura dos gases no ambiente com o tempo decorrido (Figura 49).

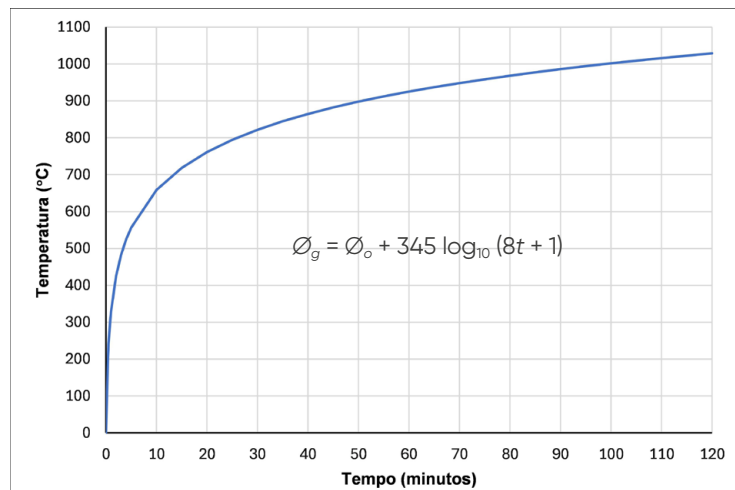


Figura 49 – Curva de incêndio padrão.

Na equação mostrada na Figura 49, ϑ_o é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, geralmente tomada igual a 20°C, e ϑ_g é a temperatura dos gases no instante t .

Para estimar a quantidade de calor que é transferida do ambiente para o aço, é necessário conhecer uma série de parâmetros, alguns relacionados às propriedades térmicas do aço, tais como calor específico e condutibilidade térmica, e outros relacionados à configuração do ambiente.

A equação da curva padrão de incêndio (Figura 49) permite determinar a temperatura dos gases. A temperatura no aço (ϑ_a) vai depender da quantidade de calor que é transferida dos gases para ele, considerando-se ou não alguma proteção térmica. Simplificadamente, pode-se admitir que $\vartheta_a = \vartheta_g$.

A verificação em incêndio pode ser feita de duas maneiras:

1) Procedimento direto:

No caso do procedimento direto, devem-se seguir as seguintes etapas:

- Definir o TRRF
 - pode ser definido por 2 métodos:
 - tabela da NBR 14432 (ABNT, 2001);
 - método do tempo equivalente NBR 14323 (ABNT, 2013);
- Determinar a temperatura do perfil (ϑ_a) para $t = \text{TRRF}$;
- Determinar os fatores de redução $k_{y\vartheta}$, $k_{E\vartheta}$ e $k_{\sigma\vartheta}$ (Tabelas 1 e 2 da NBR 14323);
- Calcular as resistências de cálculo (R_d) para cada modo de falha com os fatores de redução $k_{y\vartheta}$, $k_{E\vartheta}$ e $k_{\sigma\vartheta}$.

2.) Procedimento inverso:

Se a maior taxa de solicitação (S_d/R_d) para temperatura ambiente for menor do que 1,0, pode-se:

- Determinar os valores de $k_{y,\theta}$, $k_{E,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$ correspondentes a $S_d/R_d = 1$;
- Determinar a temperatura θ_a correspondente aos valores de $k_{y,\theta}$, $k_{E,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$;
- Determinar o tempo t correspondente à temperatura crítica θ_a usando a curva padrão;
- Comparar o tempo t com o TRRF.

Uma outra forma de fazer a análise é utilizando um procedimento descrito na EN 1993-1-2:2005, que calcula a relação entre a S_d para temperatura ambiente e a S_d para situação de incêndio. Seguindo este procedimento, obtém-se a temperatura crítica e o tempo crítico, sem a necessidade de calcular os fatores de redução $k_{y,\theta}$, $k_{E,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$. O software VCA+ da ArcelorMittal faz a verificação de vigas celulares em situação de incêndio utilizando esse procedimento preconizado pela EN 1993-1-2:2005. Uma vantagem dessa abordagem é que ela dispensa a análise térmica preliminar, que geralmente é um procedimento trabalhoso.

3.3.3.4 Dimensionamento em situação de incêndio

Para a determinação dos esforços resistentes de cálculo em situação de incêndio os ELU a serem verificados são os mesmos previstos para o dimensionamento à temperatura ambiente.

Na análise térmica, a determinação da elevação de temperatura do aço depende das características da estrutura. No caso de vigas celulares, podem-se ter as seguintes situações:

- Estruturas internas sem revestimento contra fogo;
- Estruturas internas com revestimento contra fogo;
- Estruturas externas.

O Software VCA+ faz verificações de vigas celulares em situação de incêndio apenas para os casos de vigas de eixo reto com altura constante e vigas mistas. Em todas as verificações, o software considera que o aço não possui qualquer material de proteção contra alta temperatura. As verificações de projeto são realizadas de acordo com as recomendações da EN 1993-1-2:2005 e de Vassart (2009).

Para cada critério de resistência (taxa S_d/R_d), o VCA+ fornece a temperatura crítica θ_{crit} . Essa temperatura crítica deve ser comparada com a temperatura do aço correspondente

ao TRRF determinado para a estrutura em causa, de acordo com a curva de incêndio (Figura 49).

se $\phi_{crit} > \phi_a \rightarrow \text{ok!}$

se $\phi_{crit} \leq \phi_a \rightarrow \text{não ok!}$

3.3.4 Proteção e pintura

O aço é uma liga metálica constituída majoritariamente por ferro, que é um metal susceptível à corrosão. Para evitar que o material sofra corrosão, é necessário protegê-lo do contato direto com a água e com o ar. A proteção é feita normalmente com um tratamento superficial como pintura ou galvanização.

A proteção mais comumente utilizada nas estruturas de aço é a pintura, devido à facilidade de aplicação e a possibilidade de manutenção.

A pintura pode ter baixa durabilidade se aplicada sobre uma superfície preparada de forma inadequada. A preparação de superfície é de fundamental importância para a durabilidade do revestimento.

O aço fornecido pela siderúrgica é normalmente coberto por carepa de laminação e por algum grau de corrosão superficial. A corrosão do aço pode se iniciar logo após a produção, durante o período de armazenamento. Portanto, a primeira etapa do processo de preparação da superfície para a pintura é a limpeza. A limpeza visa remover contaminantes presentes na superfície, bem como proporcionar uma rugosidade que permita uma ancoragem mecânica adequada do revestimento.

O processo de limpeza a ser utilizado em uma superfície de aço depende do intemperismo ou do grau de corrosão e das condições de exposição a que o aço será submetido.

Existem padrões de classificação da superfície de uma peça de aço quanto à corrosão, bem como de graus de limpeza apropriados para cada classe. Esses padrões são especificados por normas como a do SSPC (*Steel Structures Painting Council*). Também existem diferentes sistemas de pintura, cada qual adequado para uma determinada condição de exposição da estrutura e seus requisitos de projeto.

Para uma descrição detalhada sobre os processos de corrosão, preparação de superfície e pintura, com vistas à proteção do aço contra corrosão, recomenda-se consultar Dias (1997) e Gneco *et al.* (2003).

Referências

1. ABNT (2022): NBR 5628 – Componente construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
2. 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.
3. 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.
4. ABNT (2001): NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
5. ANSI AISC 360-05 (2005). Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago.
6. ArcelorMittal Europe. ACB® Vigas Alveolares. Long Carbon Europe – Sections and Merchant Bars.
7. Costa, C.N.; Silva, V.P. Dimensionamento de pilares em situação de incêndio, conforme a nova NBR 15200:2004 – uma análise crítica. 47º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON, 2005.
8. Dias. L.A.M. Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem. São Paulo: Zigurate Editora, 1997.
9. EN 1993-1-2:2005. Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. European Committee for Standardization.
10. EN 1994-1-2:2005. Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. European Committee for Standardization.
11. 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.
12. Gneco, C.; Mariano, R.; Fernandes, F. Tratamento de superfície e pintura. Série Manual de Construção em Aço. Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2003.
13. Oliveira, L.B. Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
14. Rodrigues, J.P.C.; Oliveira, R.L.G. Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio segundo as normas brasileiras. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
15. Vassart, O. Rapport de thèse – Analytical model for cellular beams made from hot rolled sections in case of fire. Université Blaise Pascal Clermont II, 2009.

4 Conhecendo o VCA+

4.1 Apresentação

O Software VCA+ (Viga celular ArcelorMittal) é a versão brasileira do ACB¹, que foi projetado e desenvolvido na França, pelo CTICM², a pedido da ArcelorMittal Europa (Figura 50).



Figura 50 – Imagem da tela de apresentação do Software VCA+.

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.

Conforme apresentado no item 1.5, as vigas celulares podem ser fabricadas por meio da soldagem de dois cordões (ou banzos), obtidos do corte de um perfil soldado, criando aberturas circulares, geralmente com diâmetro constante, regularmente espaçadas ao longo da viga, ou por outros processos alternativos.

4.2 Escopo geral de aplicação do Software VCA+

4.2.1 Vigas celulares

As seguintes tipologias de vigas celulares são contempladas no software (ver Tabela 4):

- Viga celular de eixo reto com altura constante;
- Viga celular mista de eixo reto com altura constante;

1 Arcelor Cellular Beams

2 Centre Technique Industriel de la Construction Métallique

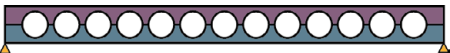
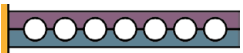
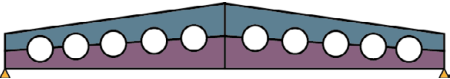
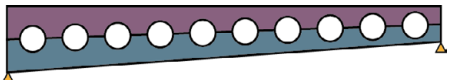
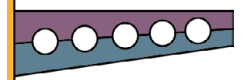

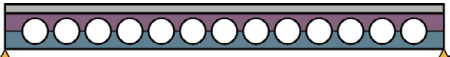
- Viga celular de eixo curvo;
- Viga celular de altura variável com uma inclinação;
- Viga celular de altura variável com duas inclinações.

As vigas celulares de eixo reto com altura constante, isoladas ou mistas, podem ser obtidas também a partir de dois perfis de dimensões diferentes. As vigas curvas e de altura variável são obrigatoriamente obtidas a partir do mesmo perfil base.

Todas as tipologias de vigas citadas podem ser verificadas como vigas biapoiadas. No entanto, vigas de eixo reto e vigas de altura variável com uma inclinação também podem ser consideradas como vigas em balanço.

As aberturas das vigas celulares podem ser preenchidas ou reforçadas com enrijecedores. Montantes de alma intermediários também podem ser reforçados por um enrijecedor plano.

Tabela 4 – 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		N/A
			
	Vigas curvas		N/A
Vigas mistas	Viga de eixo reto com altura constante		N/A

4.2.2 Vigas com aberturas especiais na alma (AEA)

O Software VCA+ também considera vigas onde as aberturas são diretamente cortadas na alma de um perfil base. Neste caso, a viga pode ser de aço (não mista) ou mista, com eixo reto e altura constante.

O formato das aberturas cortadas diretamente na alma pode ser circular ou retangular (Figura 51). As AEA podem ser reforçadas tanto por enrijecedores longitudinais, quanto por enrijecedores transversais.



Figura 51 – Exemplo de viga com aberturas especiais na alma (AEA).

O VCA+ contempla vigas com AEA apenas na condição de biapoiadas. Desse modo, vigas com AEA em balanço estão fora do escopo do software.

4.3 Configuração e opções do Software VCA+

O usuário pode configurar o idioma da interface do programa e do relatório de resultados para português ou inglês, independentemente.


Coefficientes de ponderação podem ser definidos nas opções, porém, os valores padrão recomendados são automaticamente aplicados durante a instalação.

O usuário pode configurar o endereço das pastas dos arquivos de dados, endereçar os 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 possuem definições padrão. Os limites dessas faixas são fixos para o usuário.

O usuário tem liberdade de especificar os coeficientes de ponderação, bem como os fatores de combinação e os coeficientes de resistência dos materiais, conforme Figura 52.

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_{sl}	1,100	$\gamma_{V,fi}$	1,000

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

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

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

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

Figura 52 – Aspecto da janela para configuração dos coeficientes de segurança.

4.4 Parâmetros gerais da viga

Na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 53), o usuário pode 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 (AEA), se é biapoiada ou em balanço. No caso das vigas celulares, o usuário pode, ainda, definir se a viga é de eixo reto, ou de eixo curvo, ou de altura variável.

Nessa janela ainda há uma opção de ativar um “Assistente”, que basicamente aciona as janelas de entrada de dados na sequência lógica de projeto. Depois que a viga está configurada, as janelas podem ser acessadas fora de ordem para edição de parâmetros. Cabe ressaltar, porém, que a modificação de alguns parâmetros pode invalidar outros. Se o usuário modificar a seção transversal, por exemplo, os parâmetros das aberturas (diâmetro e espaçamento) terão que ser redefinidos.

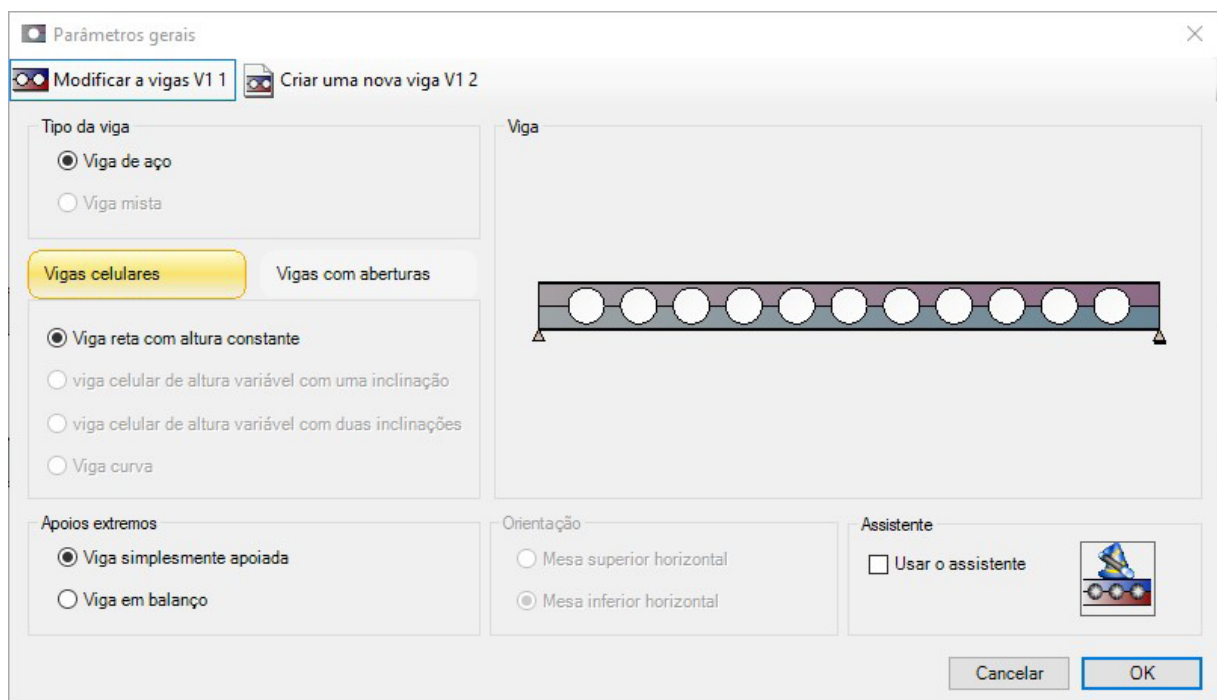


Figura 53 – Janela de configuração dos parâmetros gerais da viga.

Na Figura 54 são mostradas imagens da janela de definição dos parâmetros da seção transversal. Nessa janela, o usuário pode selecionar se a seção é monossimétrica ou duplamente simétrica, o perfil base de cada banzo e o aço de cada banzo (é possível, inclusive, selecionar cada metade da viga de um aço diferente). No banco de dados de perfis, cada seção está associada a um ou vários aços com os quais ela pode ser fornecida. Note-se que nem todas as seções podem ser fornecidas com todos os aços.

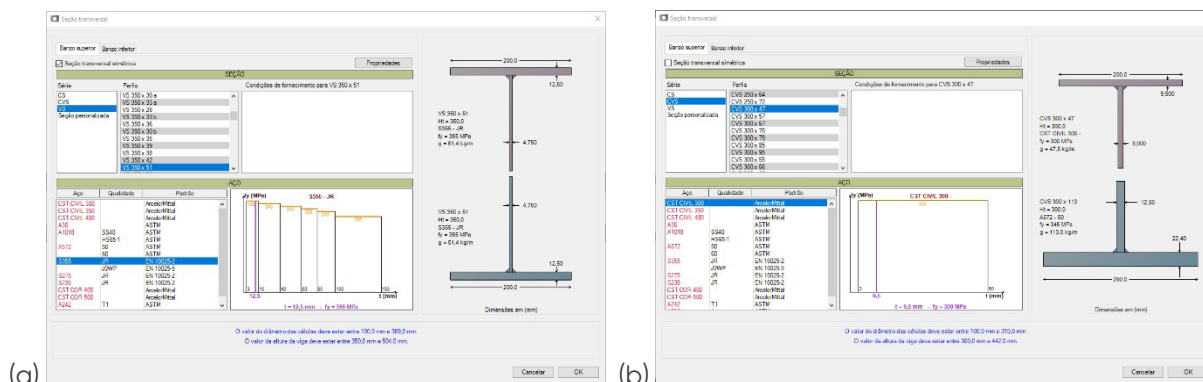


Figura 54 – Janela para configuração da seção transversal da viga.
(a) Seção duplamente simétrica; (b) Seção monossimétrica.

4.4.1 Viga celular mista

Quando o usuário seleciona “viga mista” na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 55), o programa disponibiliza o acesso à janela de configuração dos parâmetros da laje. Esta janela possui 5 abas, 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 56).

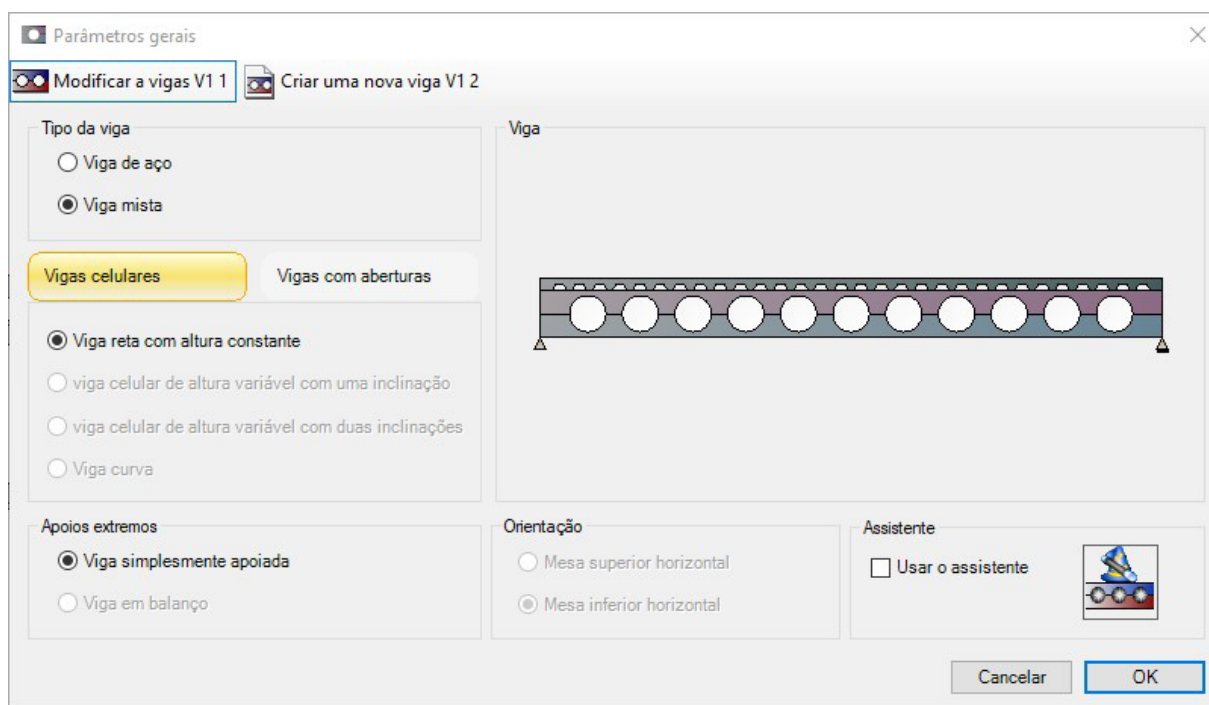


Figura 55 – Seleção de viga mista na janela de parâmetros gerais da viga.

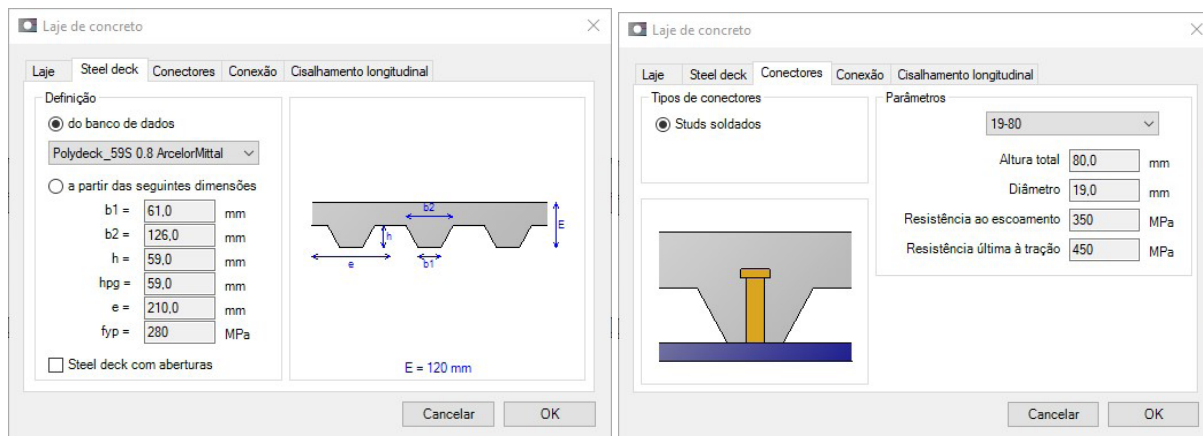


Figura 56 – Janela para configuração dos parâmetros da laje, no caso de viga celular mista.

4.4.2 Viga celular de altura variável

Quando o usuário seleciona “viga celular de altura variável com uma inclinação”, na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 57), 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 ficará disponível (Figura 58).

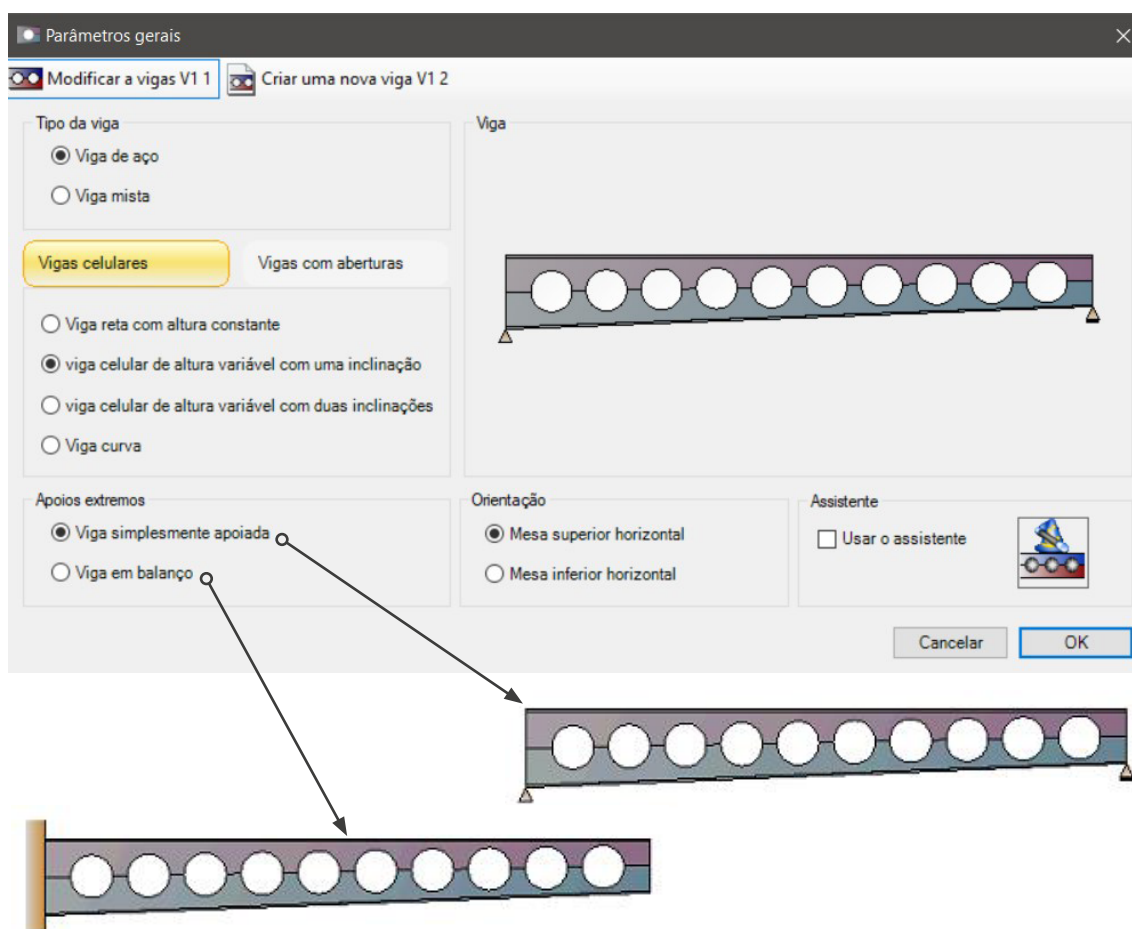


Figura 57 – Possibilidades de condições de apoio para viga celular de altura variável com uma inclinação.

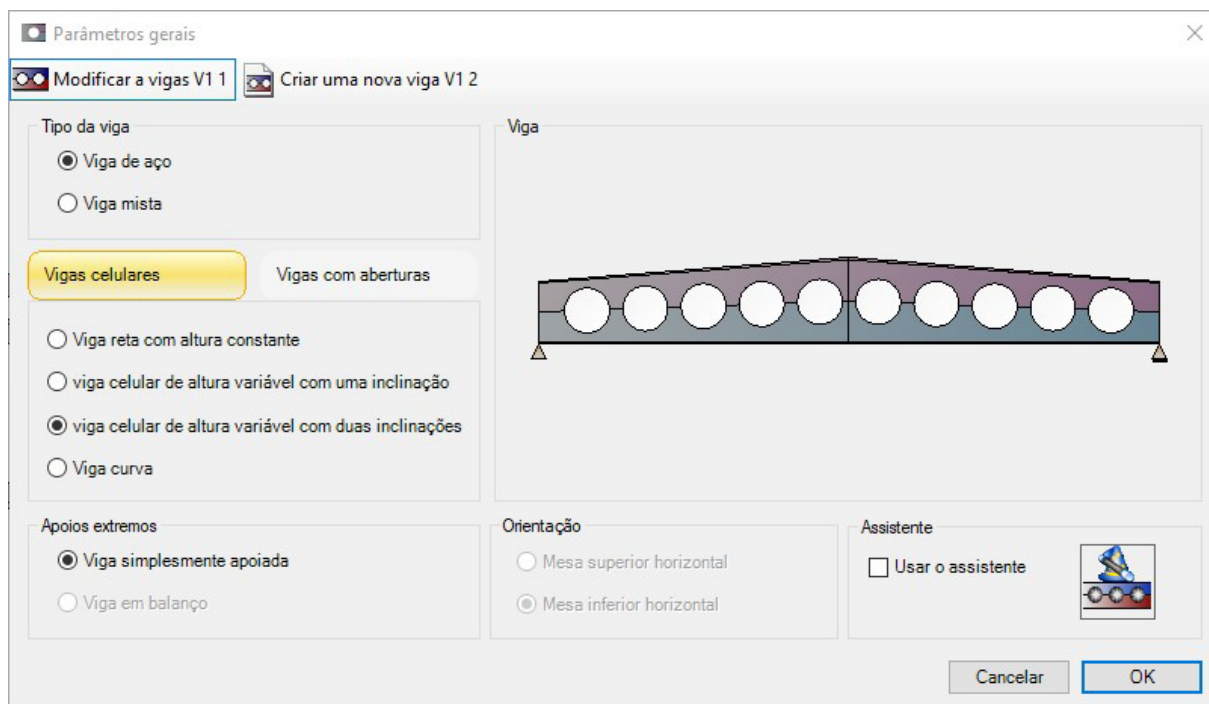


Figura 58 – Seleção de viga celular de altura variável com duas inclinações.

4.4.3 Viga celular curva

Quando o usuário seleciona “viga curva” na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga (Figura 59), apenas a condição de viga biapoiada fica disponível.

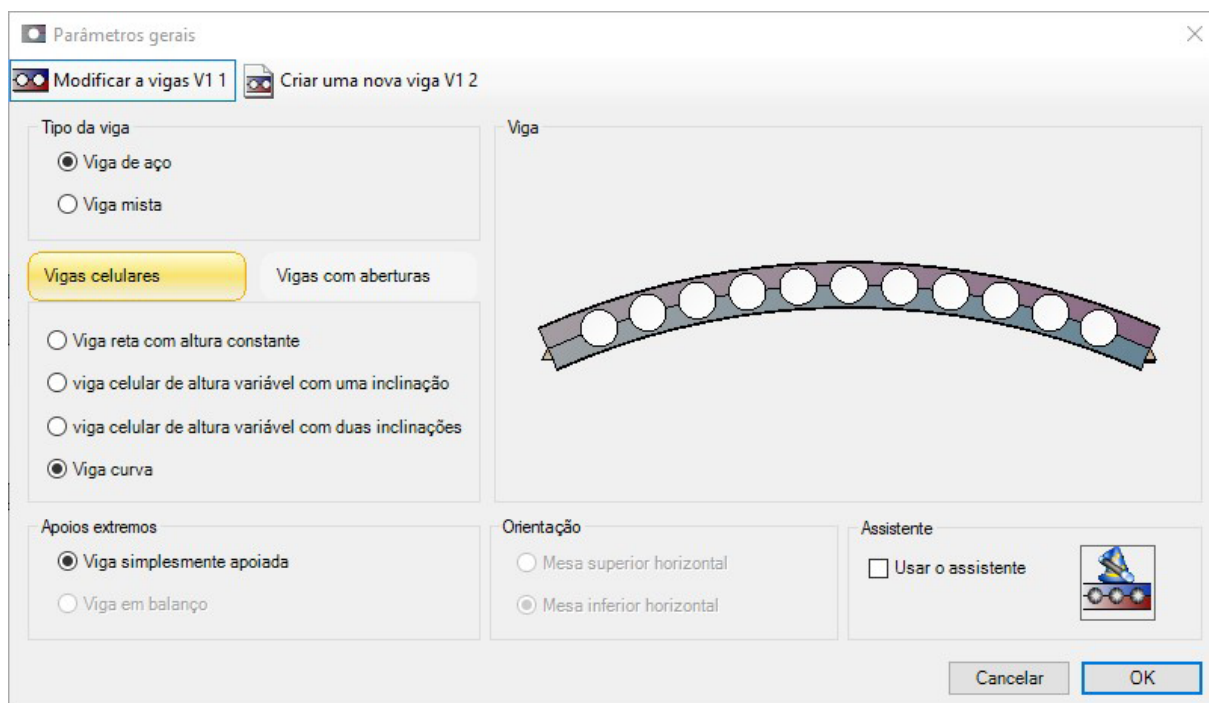


Figura 59 – Seleção de viga celular curva na janela de parâmetros gerais da viga.

4.4.4 Viga com aberturas especiais na alma (AEA)

No caso de o usuário selecionar “viga com aberturas” na janela de configuração dos parâmetros gerais da viga, ficam disponíveis as opções de viga de aço isolada e viga mista. O programa dá acesso à janela de definição de aberturas na alma (Figura 60), na qual podem ser definidos o formato, a posição e as dimensões de uma ou mais aberturas na alma.

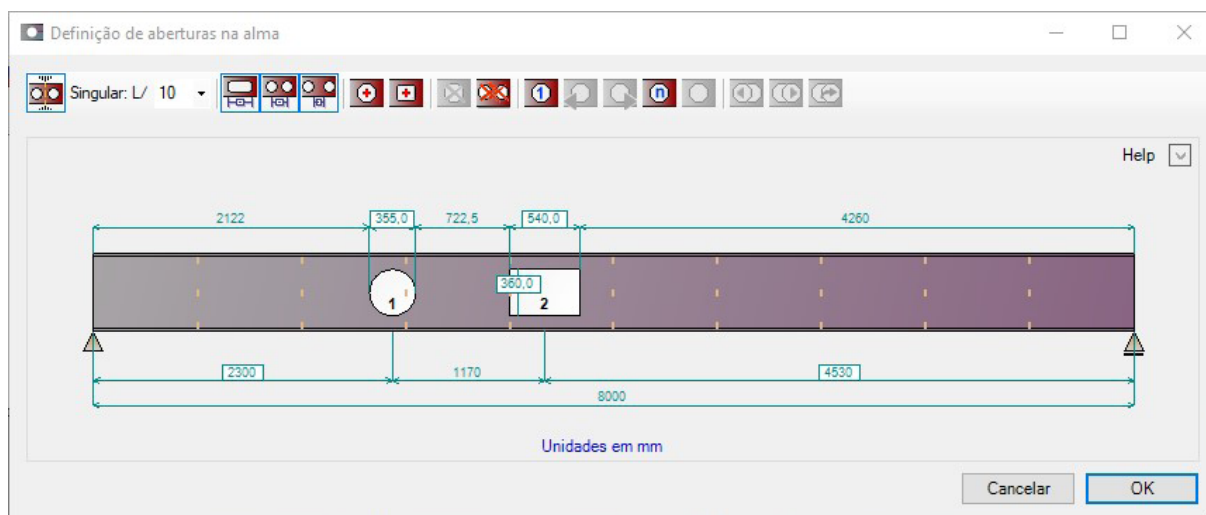


Figura 60 – Janela para definição de aberturas especiais na alma (AEA) da viga.

4.5 Parâmetros específicos da viga

Após a definição dos parâmetros gerais da viga, podem ser informados outros parâmetros mais específicos, como: comprimento do vão, raio de curvatura (no caso de viga curva), distâncias a vigas adjacentes (para computação dos carregamentos por largura de influência), tamanho e espaçamento das aberturas, etc. Diversos aspectos relacionados à definição desses e outros parâmetros são apresentados em detalhe nos exemplos descritos no capítulo 6, onde são descritos também os procedimentos para entrada dos dados dos carregamentos e das combinações de ações.

4.6 Recursos do VCA+

A partir dos parâmetros definidos pelo usuário, o Software VCA+ realiza as seguintes tarefas:

- Cálculo das propriedades da seção transversal;
- Cálculo das forças internas e momentos nas seções críticas ao longo da viga, para os diferentes casos de carga;
- Combinações de ações nos estados-limites últimos (ELU), de serviço (ELS) e de incêndio, quando relevante;

- Verificação da capacidade resistente da viga no ELU;
- Cálculo das flechas e das frequências de vibração;
- Avaliação das vibrações de acordo com o método europeu “Hivoss”;
- Verificação do comportamento de vigas celulares de eixo reto em situações de incêndio (ver 3.3.3.4).

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, modelos específicos de resistência são considerados para:

- A resistência à estabilidade dos montantes de alma intermediários;
- O cálculo das deformações e deslocamentos.

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

Os coeficientes de ponderação podem ser definidos pelo usuário para as cargas e para as resistências.

O projeto das ligações ou dos apoios nas extremidades das vigas está fora do escopo do software. Essas partes das vigas devem ser projetadas com atenção, especialmente no caso de vigas celulares com montantes de alma estreitos nas extremidades.

O software não avalia os efeitos locais de forças concentradas; nesses casos, recomenda-se soldar enrijecedores transversais nos montantes de alma intermediários das vigas celulares onde essas forças atuam, e a verificação dessa região deve ser feita à parte.

4.7 Critérios de verificação

O Software VCA+ realiza verificações de resistência para os ELU (resistência da seção transversal, flambagem local, flambagem lateral com torção) de acordo com os princípios dos Eurocódigos 3 e 4. O software foi compatibilizado com a NBR 8800 (ABNT, 2024).

Os esforços internos são calculados por meio de formulações analíticas. As verificações de resistência são realizadas para as combinações de ações definidas pelo usuário. No documento “Relatório de Projeto Preliminar”, os critérios de resistência são apresentados como uma taxa Γ dada pela razão entre a solicitação de cálculo (esforços com índice “Ed”)

e a resistência de cálculo (esforços com índice "Rd"). A taxa de solicitação ao momento fletor, por exemplo, é expressa por:

$$\Gamma_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \quad (29)$$

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

O programa calcula a flecha elástica máxima para qualquer combinação definida pelo usuário no ELS. Cabe ao usuário verificar se as flechas calculadas atendem aos critérios de projeto e se há necessidade de especificar contraflechas.

Exclusivamente no caso de vigas biapoiadas de eixo reto, o programa calcula a frequência natural para qualquer caso de carga e para qualquer combinação definida pelo usuário no ELS. Em cada caso, dois valores são fornecidos: no primeiro a massa é considerada distribuída uniformemente ao longo da viga e, no segundo, a massa é considerada concentrada – esta verificação não está disponível para vigas curvas ou vigas com altura variável.

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 61) são exibidas no relatório preliminar de projeto (intermediário ou detalhado).

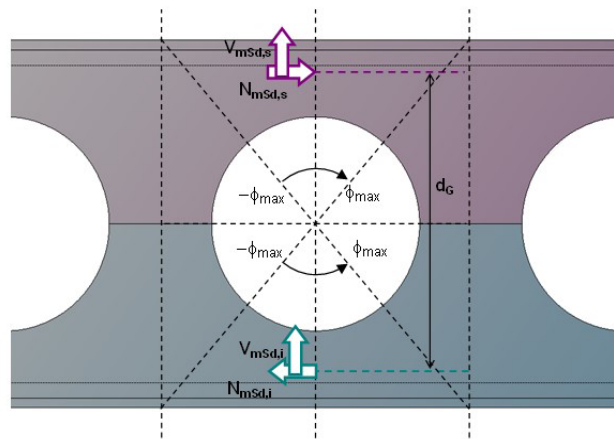


Figura 61 – Forças axiais e forças cortantes nos trêz no centro de uma abertura.

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 $-\varnothing_{max}$ a $+\varnothing_{max}$, com incremento de 1 grau são verificadas. Para cada seção transversal inclinada (associada a um ângulo \varnothing), 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: $\Gamma_{MNV} \leq 1,0$

4.8 Resultados apresentados pelo Software VCA+

O VCA+ processa a viga quando o usuário solicita o relatório de projeto preliminar. É possível escolher o nível padrão de detalhe do relatório dentre as seguintes opções:

- Resumo dos resultados;
- Síntese;
- Relatório detalhado;
- Desenhos da viga.

O usuário pode alterar o nível de detalhe diretamente no visualizador do relatório.

O software permite ao usuário identificar o responsável pelo cálculo, a empresa, o projeto e a viga em questão. É possível, inclusive, carregar uma imagem da logomarca da empresa que pode ser exibida no relatório de projeto.

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.

4.9 Recursos especiais do VCA+

O VCA+ disponibiliza dois recursos especiais muito úteis para a verificação de um conjunto de vigas, ou para verificar diversas opções de perfis para uma mesma viga. Um deles é a possibilidade de manter a configuração de diversas vigas simultaneamente enquanto o

software está rodando. Para cada nova viga criada, o VCA+ abre uma nova aba na janela principal, como exibido na Figura 62.

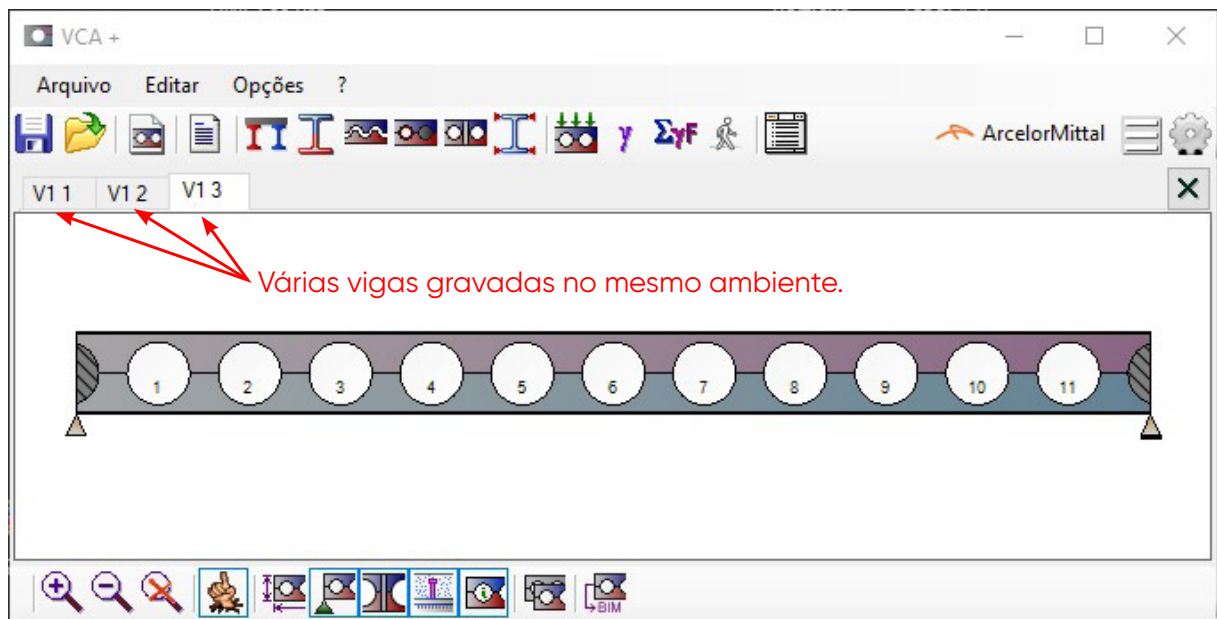


Figura 62 – Abas na janela principal do VCA+ para diversas vigas em simultâneo.

Eventualmente, o usuário quer testar a viga corrente alterando apenas um ou outro parâmetro. Clicando com o botão direito na aba da viga corrente, abre-se um pequeno menu com as opções "salvar", "duplicar" e "fechar". A opção "duplicar" é muito útil, pois gera uma cópia da viga, permitindo modificar algum parâmetro preservando a verificação anterior.

5 Pré-dimensionamento e verificação no VCA+

5.1 Catálogo VCS ArcelorMittal

Embora visualmente semelhantes às vigas de alma cheia, as vigas celulares apresentam um comportamento estrutural bastante distinto devido às aberturas circulares em sua alma. Essas aberturas modificam de forma significativa a distribuição das tensões, exigindo uma abordagem de dimensionamento mais criteriosa.

Enquanto nas vigas de alma cheia o dimensionamento se baseia na verificação de seis modos de falha clássicos, nas vigas celulares a capacidade resistente está associada a um conjunto de relações geométricas complexas – envolvendo tanto as dimensões da viga original quanto as das aberturas, como a_o/Ht , e/a_o e d/bf , conforme abordado no Anexo A.

Pensando em otimizar esse processo, a ArcelorMittal desenvolveu o Catálogo VCS – uma seleção de perfis soldados especialmente projetados para aplicação como vigas celulares, que apresentam geometrias mais adequadas para esse tipo de uso, proporcionando maior eficiência estrutural. Além disso, foi elaborado um fluxograma de pré-dimensionamento utilizando o Software VCA+, que serve como base para a seleção e aplicação dos perfis do catálogo, exibido na sequência deste Manual.

5.2 Vigas celulares de eixo reto

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

1. Estimar a altura total da viga celular a partir da relação $H_t = L/17$;

2. estimar a altura aproximada do perfil base fazendo:

$$d = \frac{H_t}{1,5}, \text{ considerando que a taxa de expansão ótima é } k = 1,5 = \frac{H_t}{d} \quad (30)$$

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

$$t_w \geq \frac{H_t}{3,94\sqrt{E/f_y}} \quad (31)$$

Para a verificação da viga celular de eixo reto 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_o) e da relação passo/diâmetro (e/a_o);

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 63.

5.3 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:

$$H_t^* \cong L / 21 \text{ para } 7,5 \text{ m} \leq L \leq 9,0 \text{ m} \quad (32)$$

$$H_t^* \cong L / 25 \text{ para } L > 9,0 \text{ m} \quad (33)$$

2. altura total do perfil base: $d^* \cong \frac{H_t^*}{1,2} \quad (34)$

3. diâmetro das aberturas: $a_0^* \cong 0,84d^* \quad (35)$

4. raio mínimo de curvatura: $R^* = \frac{a_0^*}{4} \frac{E_a}{f_y} \quad (36)$

5. flecha do arco: $\delta^* = R^* - \frac{\sqrt{4R^{*2} - L^2}}{2} \quad (37)$

Esse procedimento está representado na forma de um fluxograma na Figura 64.

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 5.2 e na Figura 63.

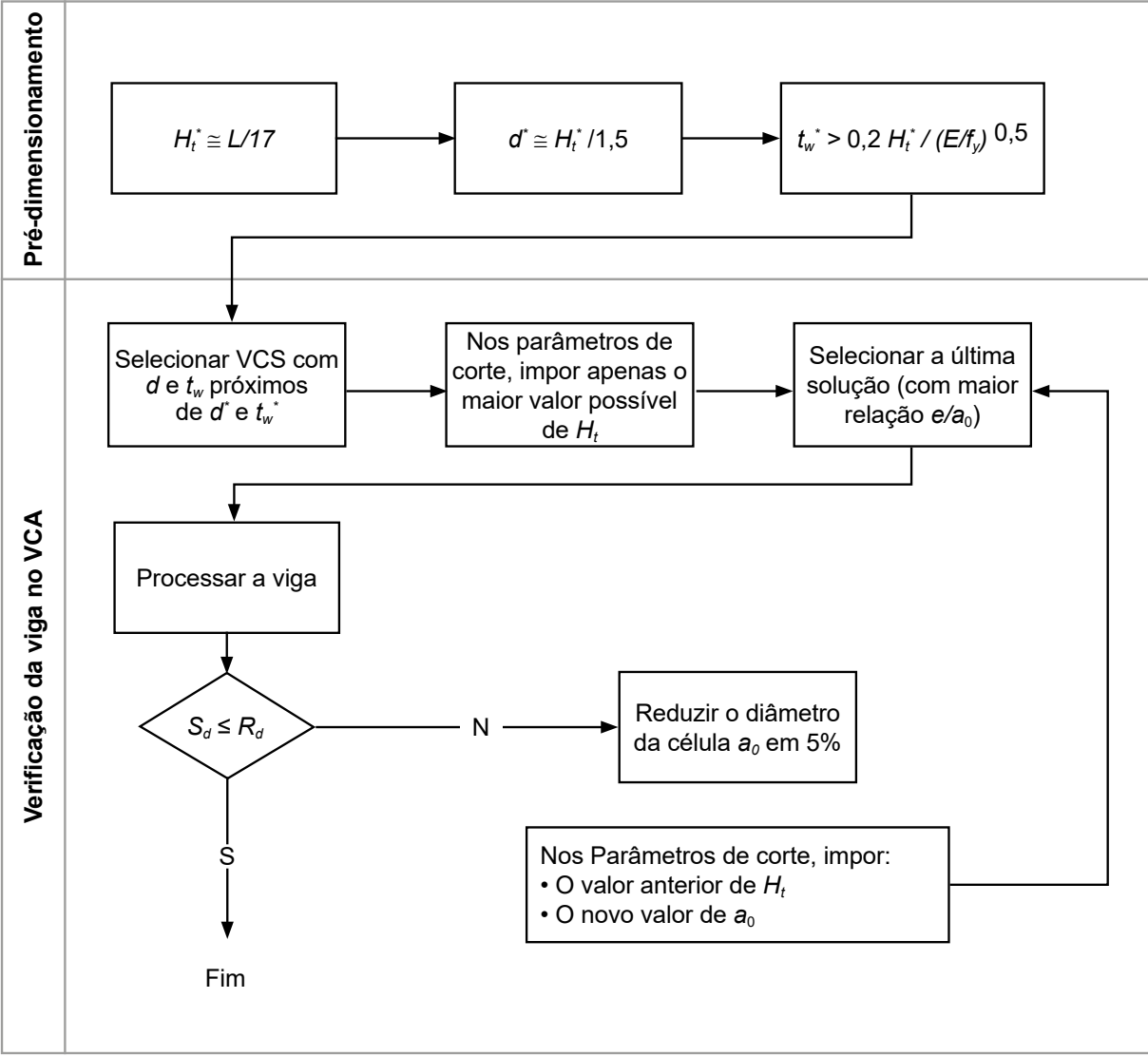


Figura 63 – Fluxograma para pré-dimensionamento e verificação do dimensionamento de vigas celulares de eixo reto no VCA+.

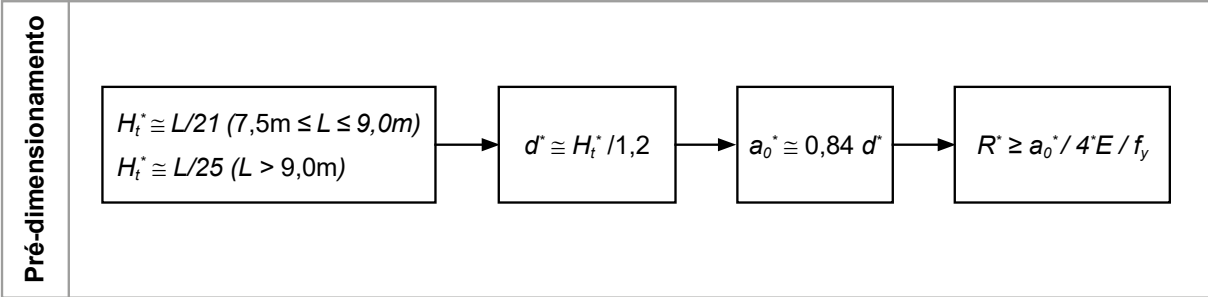


Figura 64 – Fluxograma para pré-dimensionamento de vigas celulares de eixo curvo no VCA+.

5.4 Diretrizes para solucionar problemas de dimensionamento

O Software 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

Note-se que esses critérios de resistência podem ser agrupados em duas categorias: (1) critérios relacionados à abertura crítica; e (2) critérios relacionados ao montante crítico.

Na Tabela 5 são sugeridas diretrizes para uma possível redução de peso do perfil original.

Tabela 5 – 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 6 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.

Tabela 6 – Diretrizes para solução de problemas de dimensionamento de vigas celulares.

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 esbeltez 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 $\Gamma Vh, max$

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 $\Gamma Vh, max$

Além das diretrizes sugeridas na Tabela 6, 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).

6 Exemplos

6.1 Viga celular com perfil soldado VS

Deseja-se verificar a viga de cobertura a seguir como uma viga celular de eixo reto, altura constante e não mista.

Parâmetros gerais:

vão horizontal da viga:	8 m
comprimento destravado:	2 m (distância entre terças)
apoios de extremidade:	viga simplesmente apoiada
perfil base:	VS 350x35 (simétrico)
aço:	ASTM A572 Gr.50

Corte da viga:

número de células:	$n = 19$	
diâmetro das células:	$a_o = 320 \text{ mm}$	($a_o/d = 0,91$)
espaçamento das células:	$e = 400 \text{ mm}$	($e/a_o = 1,25$)
altura total do perfil celular:	$H_t = 450 \text{ mm}$	($H_t/d = 1,29$)

Casos de carga:

ações permanentes (G):

– carga permanente:	0,31 kN/m	(peso próprio)
– carga de superfície:	1,00 kN/m ²	(aplicada sobre a largura de influência)
sobrecarga 1 (Q1):	5,30 kN/m	(carga uniforme)
sobrecarga 2 (Q2):	1,00 kN/m	(carga uniforme)

Combinações últimas:


Estados-limites últimos:

- $U1 = 1,40 G + 1,50 Q1 + 1,05 Q2$
- $U2 = 1,40 G + 1,05 Q1 + 1,50 Q2$

Estados-limites de serviço:

- $S1 = 1,00 G + 1,00 Q1$
- $S2 = 1,00 G + 1,00 Q1 + 0,60 Q2$
- $S3 = 1,00 G + 1,00 Q2$
- $S4 = 1,00 G + 0,60 Q1 + 1,00 Q2$

6.1.1 Criar uma 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 65), configure as opções da seguinte maneira:

1. selecione a aba **Criar uma nova viga**;
2. escolha **Viga de aço** para calcular vigas não-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.

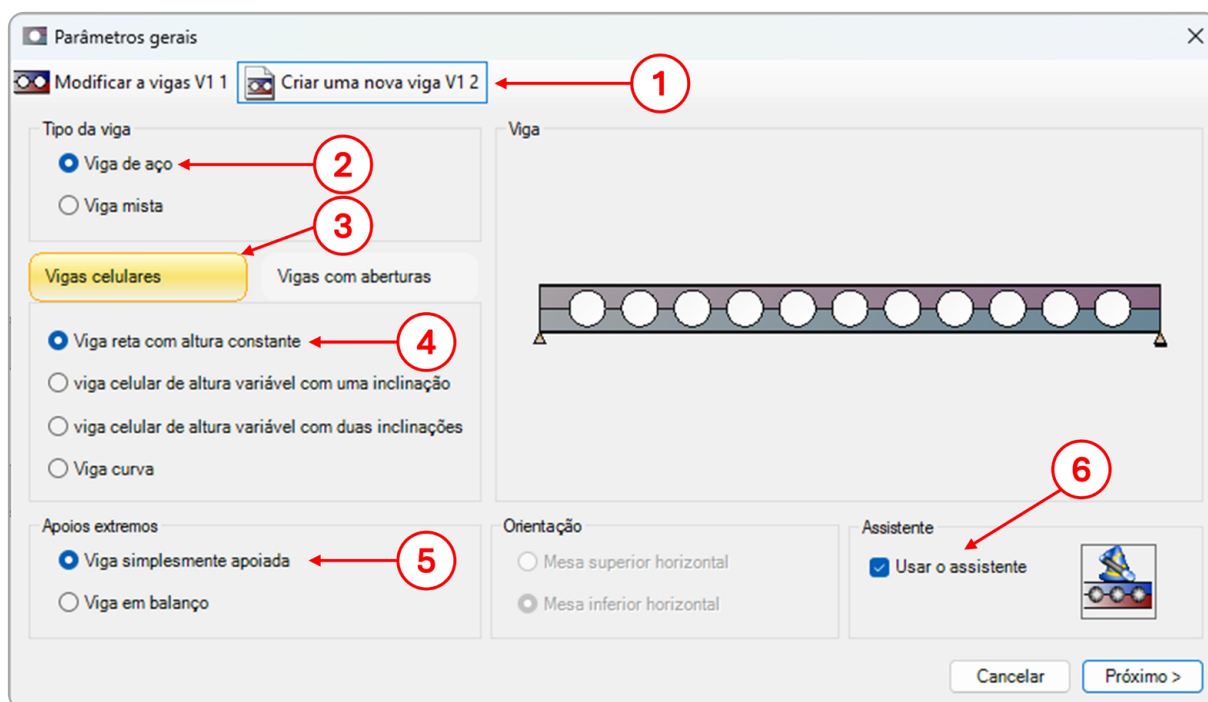


Figura 65 – Configuração da janela Parâmetros gerais.

6.1.2 Identificação do projetista

Na janela Identificação (Figura 66), o usuário pode identificar o projetista, a empresa, o projeto e a viga, além de poder acrescentar algum comentário relacionado à viga em análise e uma imagem que identifique a empresa, que será apresentada no relatório de projeto (memorial de cálculo).

Os campos desta janela podem ser preenchidos parcialmente, ou simplesmente deixados em branco. As informações inseridas serão apresentadas no Relatório de projeto preliminar. Para avançar, clique no botão Próximo no canto inferior direito.

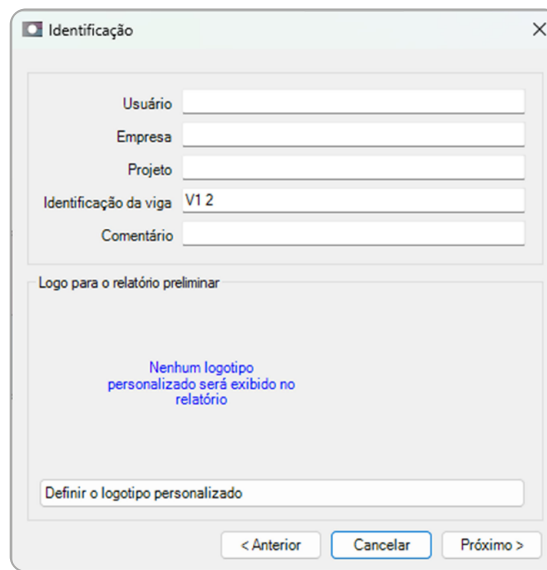
A janela 'Identificação' possui campos para 'Usuário', 'Empresa', 'Projeto', 'Identificação da viga' (preenchido com 'V1 2') e 'Comentário'. Abaixo, há uma seção 'Logo para o relatório preliminar' com o texto 'Nenhum logotipo personalizado será exibido no relatório' e um campo 'Definir o logotipo personalizado'. No rodapé, há os botões '< Anterior', 'Cancelar' e 'Próximo >'.

Figura 66 – Janela Identificação.

6.1.3 Vão e posição da viga

Na janela **Vão e posição da viga** (Figura 67), informe os seguintes parâmetros da viga:

1. vão horizontal da viga: **8,0 m**
2. tipo de viga: **Viga intermediária**
3. espaçamentos L1 e L2: **4,0 m**

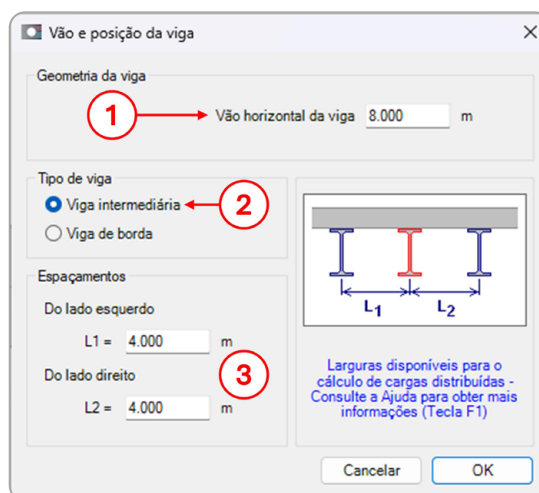
A janela 'Vão e posição da viga' contém a seção 'Geometria da viga' com o campo 'Vão horizontal da viga' (8.000 m) rotulado com um 1. A seção 'Tipo de viga' tem 'Viga intermediária' selecionada (rotulada com um 2) e 'Viga de borda' desativada. A seção 'Espaçamentos' mostra 'Do lado esquerdo' com L1 = 4.000 m e 'Do lado direito' com L2 = 4.000 m (rotulada com um 3). Um diagrama ilustra a viga com apoios e distâncias L1 e L2. No rodapé, há os botões 'Cancelar' e 'OK'. Um texto de ajuda indica: 'Larguras disponíveis para o cálculo de cargas distribuídas - Consulte a Ajuda para obter mais informações (Tecla F1)'.

Figura 67 – Configuração da janela Vão e posição da viga.

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

6.1.4 Seção transversal

O perfil base e o tipo de aço são configurados na janela **Seção transversal** (Figura 68). 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 da viga celular;
2. selecione a série **VS**;
3. selecione o perfil base **VS 350×35**;
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 **OK** no canto inferior direito.

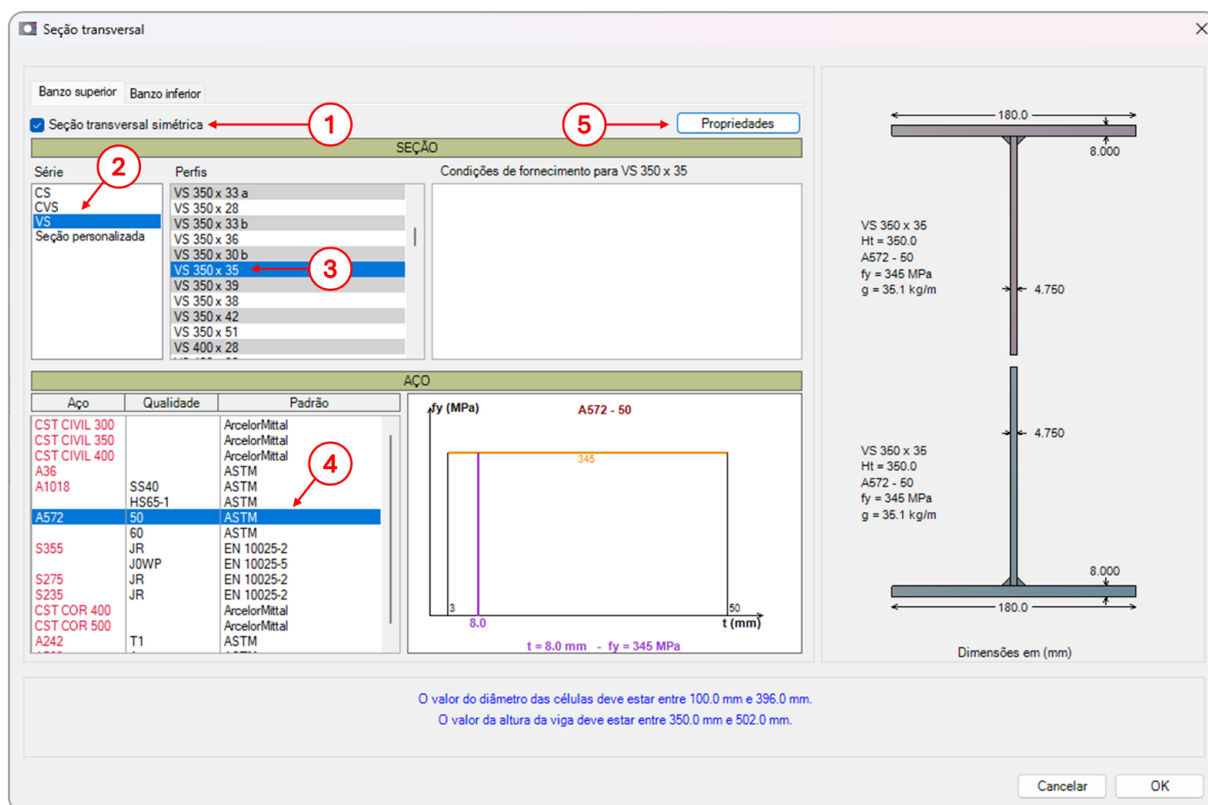


Figura 68 – Configuração da janela **Seção transversal**.

6.1.5 Corte da viga

A configuração do corte da viga celular é realizada na janela **Corte das vigas** (Figura 69). O VCA+ busca automaticamente as soluções de cortes possíveis para os parâmetros impostos pelo usuário, sempre respeitando o escopo das vigas celulares definido nas **Opções do software**. O usuário deve impor pelo menos um dos três parâmetros: diâmetro

das células (a_0), espaçamento das células (e) e altura total (H_t). Para encontrar a(s) solução(ões) de corte da viga, siga o seguinte procedimento:

1. selecione a aba **Projeto da viga**;
2. marque a caixa de seleção **Diâmetro das células** e informe o valor de $a_0 = 320$ mm;
3. marque a caixa de seleção **Espaçamento das células** e informe o valor $e = 400$ mm;
4. marque a caixa de seleção **Altura total** e informe o valor de 450 mm;
5. clique no botão **Buscar as soluções**;
6. as possíveis soluções são listadas na tabela. Clique sobre uma solução para visualizar o croqui do corte na região inferior da janela. Caso não haja solução, altere os parâmetros de corte ou reduza o número de parâmetros impostos.

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

Corte das vigas

Projeto da viga | Ajustes e dados

Dimensões da viga
Comprimento da viga: 8 m

Parâmetros impostos
Pelo menos um parâmetro deve ser imposto

- ☒ Diâmetro das células $a_0 = 320.00$ mm
- ☒ Espaçamento das células
Espaçamento $e = 400.00$ mm
- Largura do montante $w = 80.000$ mm
- Razão $e / a_0 = 1.250$
- ☒ Altura total 450.00 mm

Buscar as soluções

Número de soluções : 1

n°	a_0 (mm)	w (mm)	e (mm)	e / a_0	n	Ht (mm)	m (kg)
1	320.0	80.0	400.0	1.25	19	450.0	253

Perfil base para ambos os banzos : VS 350 x 35

Cancelar OK

Figura 69 – Configuração da janela Corte das vigas.

6.1.6 Configuração de células

Na janela **Configuração de células** (Figura 70) é possível modificar as aberturas individualmente. A abertura selecionada pelo usuário pode ser definida como células normais ou **células preenchidas**, conforme a seguir:

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

Neste momento, nenhuma modificação nas células será realizada. Clique no botão **OK** no canto inferior direito para prosseguir.

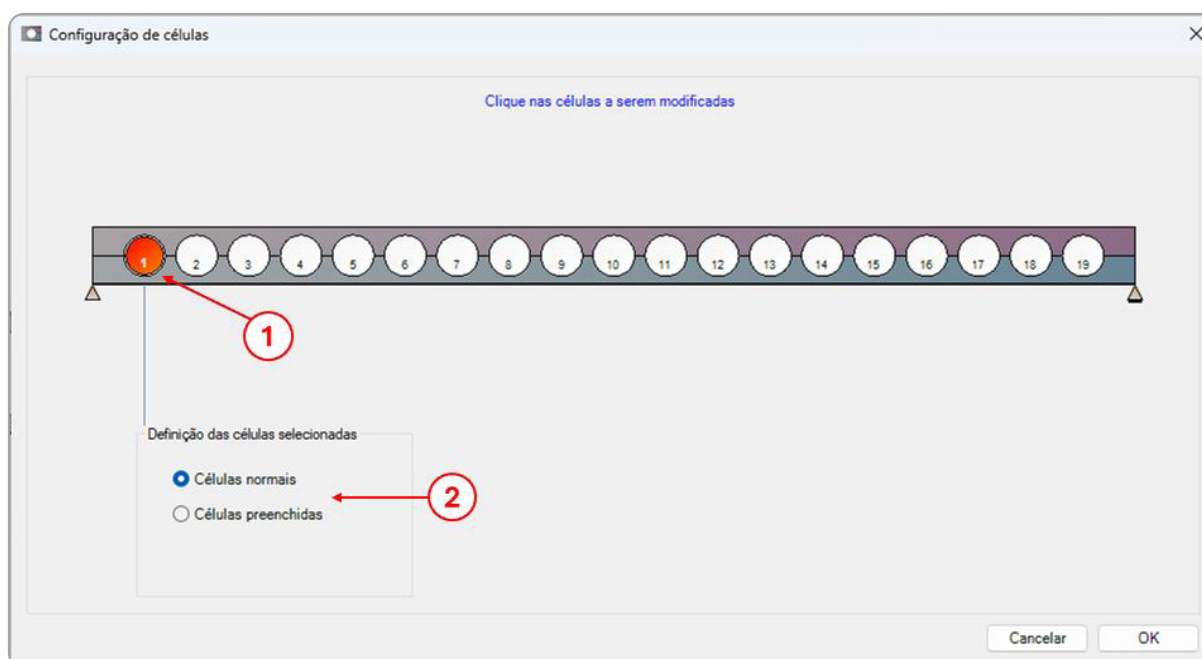


Figura 70 – Janela **Configuração de células**.

6.1.7 Enrijecimento de montantes de alma

O **VCA+** possibilita a especificação de enrijecedores nos montantes de alma (Figura 71).

1. Clique em um montante para adicionar ou remover um enrijecedor.
2. Especifique a geometria (largura e espessura) e a resistência escoamento do aço da chapa enrijecedora.

Neste exemplo, nenhum montante de alma será enrijecido. Clique no botão **OK** no canto inferior direito para prosseguir.

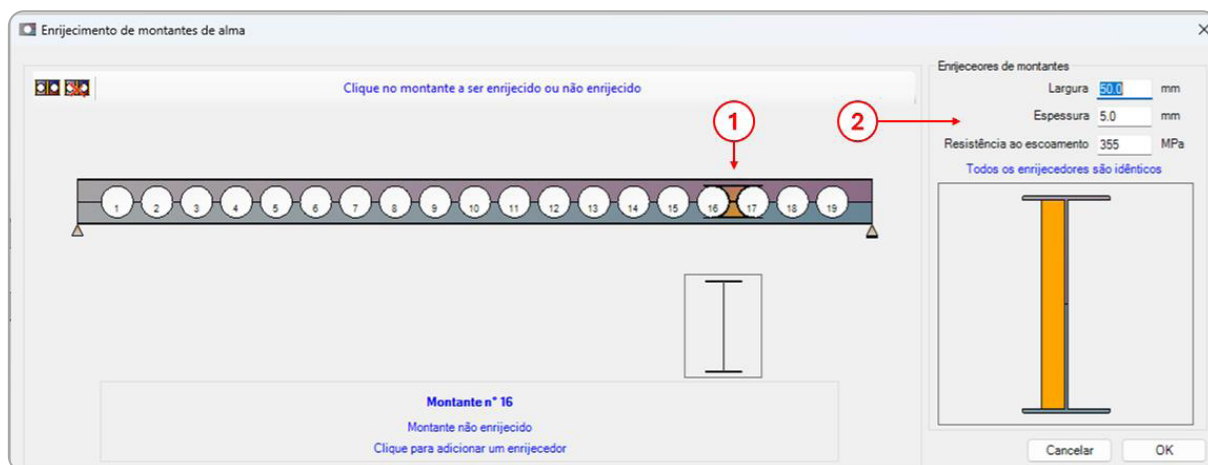


Figura 71 – Janela Enrijecimento de montantes de alma.

6.1.8 Contenção lateral da viga

A configuração de contenção lateral é feita na janela **Contenção lateral da viga** (Figura 72). Para isso, siga os passos a seguir.

1. Defina o tipo de contenção lateral. As opções são **Contenção lateral contínua** (por exemplo, vigas mistas), ou **Contenções laterais a serem definidas** (por exemplo, pontos de travamento horizontal de uma viga isolada de cobertura).
2. Selecione a opção **Contenções laterais a serem definidas** e clique no botão **Adicionar uma contenção lateral** para inserir o(s) ponto(s) de contenção desejado(s). A contenção inserida é identificada por um quadrado amarelo, posicionado no eixo horizontal médio da viga.
3. Ative ou desative a opção **Atração a pontos singulares**. Com esta opção ativada é possível mover as contenções com o cursor do mouse para os pontos verdes pré-definidos pelo programa, conforme mostrado na Figura 72.
4. Escolha se o espaçamento da(s) contenção(ões) será medido em relação ao apoio esquerdo ou direito.
5. Clique e arraste uma contenção para movê-la ao longo do eixo longitudinal da viga.
6. Alternativamente, insira manualmente o espaçamento da contenção lateral em relação ao apoio escolhido no passo (4).
7. Clique no botão **Remover uma contenção lateral** para excluir um ponto de contenção.

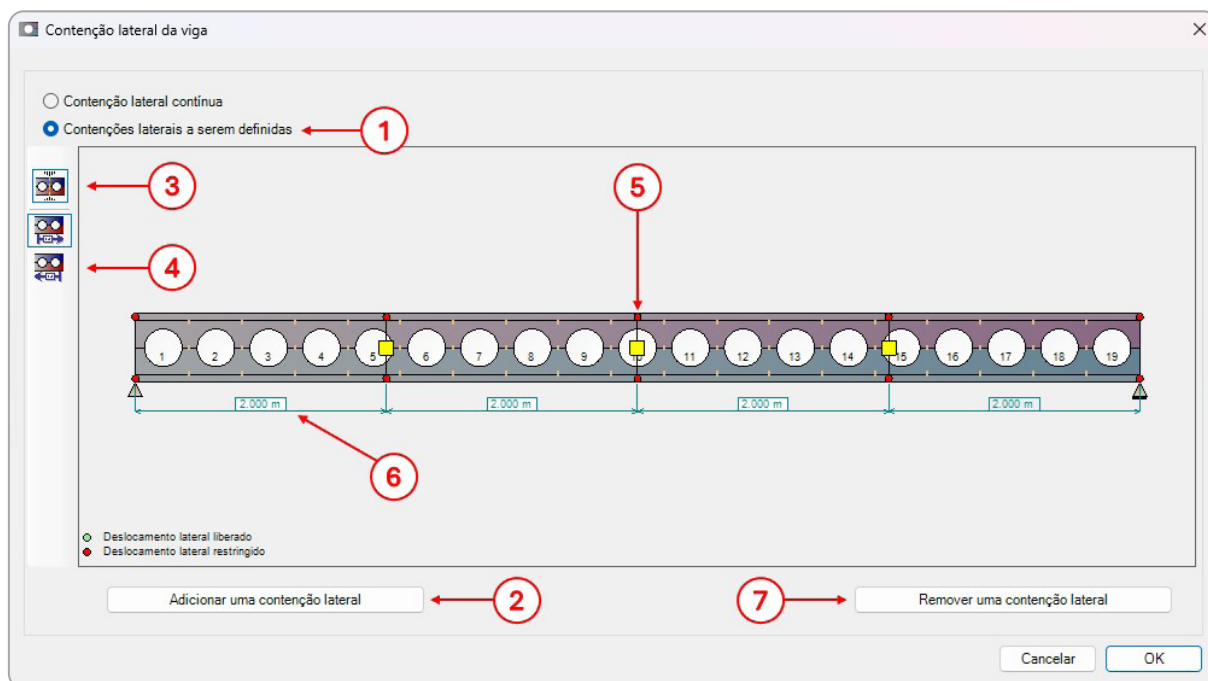


Figura 72 – Configuração da janela **Contenção lateral da viga**.

Neste exemplo, três contenções laterais foram definidas, conforme mostrado na Figura 72. Após a inserção da contenção, clique no botão **OK** no canto inferior direito para prosseguir.

6.1.9 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 caso de ação permanente (G), dois casos de sobrecarga de utilização (Q1 e Q2), e um caso 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.

6.1.9.1 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:

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**.

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

☒ **G** Ações permanentes 1

☐ **Q1** Sobrecarga 1

☐ **Q2** Sobrecarga 2

☐ **QC** Cargas de construção

Cargas distribuídas

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientação
1	0.0	0.311	8.000	0.311	Vertical
2					
3					
4					

2

Informação... Excluir Adicionar

Cargas concentradas

i	x (m)	F (kN)	Orientação
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Excluir Adicionar

Forças axiais de extremidade

Força 0.0 kN

Posição Mesa superior

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 0.0 kN.m

Lado direito 0.0 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 4 m

Carga uniforme 1.000 kN/m²

3 Orientação Vertical

Força resultante 32 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 17.24 kN

Apoio direito 17.24 kN

Soma 34.49 kN

Diagrama de Cargas:

Um diagrama de uma viga com 19 pontos numerados. Uma carga distribuída vertical é aplicada sobre a viga. As setas coloridas (M, V, N) indicam os tipos de diagramas de influência disponíveis.

Cancelar OK

Figura 73 – Janela para a Definição dos casos de carregamento – Ações permanentes.

6.1.9.2 Sobrecargas (Q1 e Q2)

Para inserir as sobrecargas Q1 e Q2, siga os seguintes passos:

1. selecione o caso de carregamento **Q1 – Sobrecarga 1**;
2. no painel **Cargas Distribuídas**, clique no botão **Adicionar**;
3. insira a carga uniformemente distribuída de **5,3 kN/m** sobre todo o comprimento da viga;
4. repita os passos anteriores para a **Q2 – Sobrecarga 2** de 1,00 kN/m.

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

☐ G Ações permanentes
☒ Q1 Sobrecarga 1
☐ Q2 Sobrecarga 2
☐ QC Cargas de construção

Cargas distribuídas

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientação
1	0.0	5.300	8.000	5.300	Normal
2					
3					
4					

Excluir Adicionar

Cargas concentradas

i	x (m)	F (kN)	Orientação
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Excluir Adicionar

Forças axiais de extremidade

Força 0.0 kN
Posição Mesa superior

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 0.0 kN.m
Lado direito 0.0 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 4 m
Carga uniforme 0.0 kN/m²
Orientação Vertical
Força resultante 0 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 21.2 kN
Apoio direito 21.2 kN
Soma 42.4 kN

Cancel OK

Figura 74 – Janela para a Definição dos casos de carregamento – Sobrecargas.

6.1.10 Coeficientes Gama

Os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação podem ser alterados na janela **Coeficientes Gama**. O VCA+ carrega automaticamente os valores padrões em conformidade com a NBR 8800 (ABNT, 2024), definidos no menu **Opções > Opções do software > Coeficientes nacionais padrão**. Para recuperar os valores padrões, basta clicar no botão Reiniciar no canto inferior esquerdo da janela. Neste exemplo, os valores mostrados na Figura 75 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

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	Laje	Incêndio
γ_{a1}	=	1.100
γ_{a2}	=	1.350

Usar os valores padrão

Reiniciar

Cancelar OK

Figura 75 – Configuração dos coeficientes de ponderação.

6.1.11 Combinações de ações

As verificações no VCA+ são feitas para estados-limites últimos, estados-limites de serviço e estados-limites últimos 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 76), 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** no canto inferior direito para prosseguir.

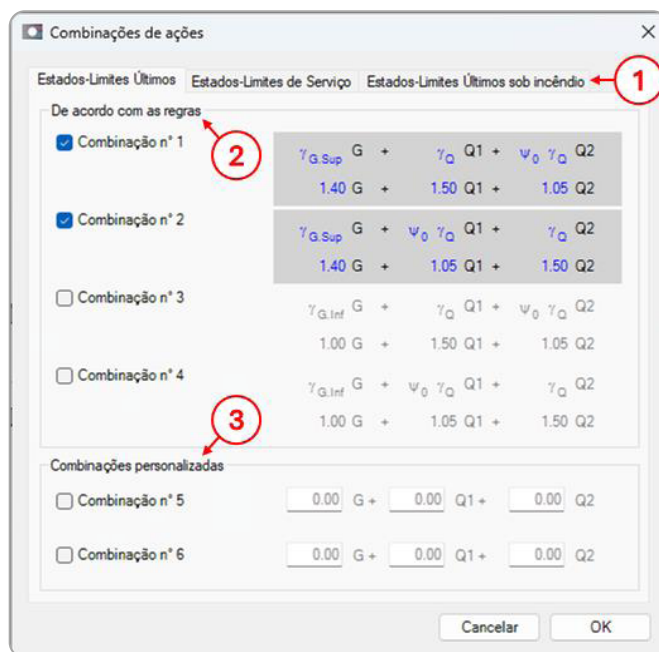



Figura 76 – Definição das combinações de ações.

6.1.12 Resultados – Relatório de Projeto Preliminar

Após a correta configuração de todos os parâmetros apresentados nos itens 6.1.1 a 6.1.11, clique no botão  na barra de ferramentas principal para gerar o **Relatório de Projeto Preliminar** (Figura 77). No menu **Opções**, marque o item **Relatório Detalhado** (1).

Em seguida, vá até à página 18 do relatório onde os **resumos dos critérios** dos **estados-limites últimos (ELU)** são apresentados (Figura 78). Nota-se que todos os critérios foram verificados com êxito, exceto a resistência à flambagem dos montantes, onde o montante nº 1 apresentou uma taxa de carregamento de 1,155 para a combinação de ações U1 no ELU (2).

O montante nº 1 corresponde ao primeiro montante de alma, entre as células 1 e 2 (ver croqui da viga no relatório), e o simétrico dele é o montante entre as células 18 e 19. 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. Existem duas alternativas para tentar solucionar a flambagem do montante de alma, a saber: enrijecer o montante de alma ou preencher a abertura adjacente ao montante de alma (na direção crescente do esforço cortante). A seguir, as duas alternativas são apresentadas.

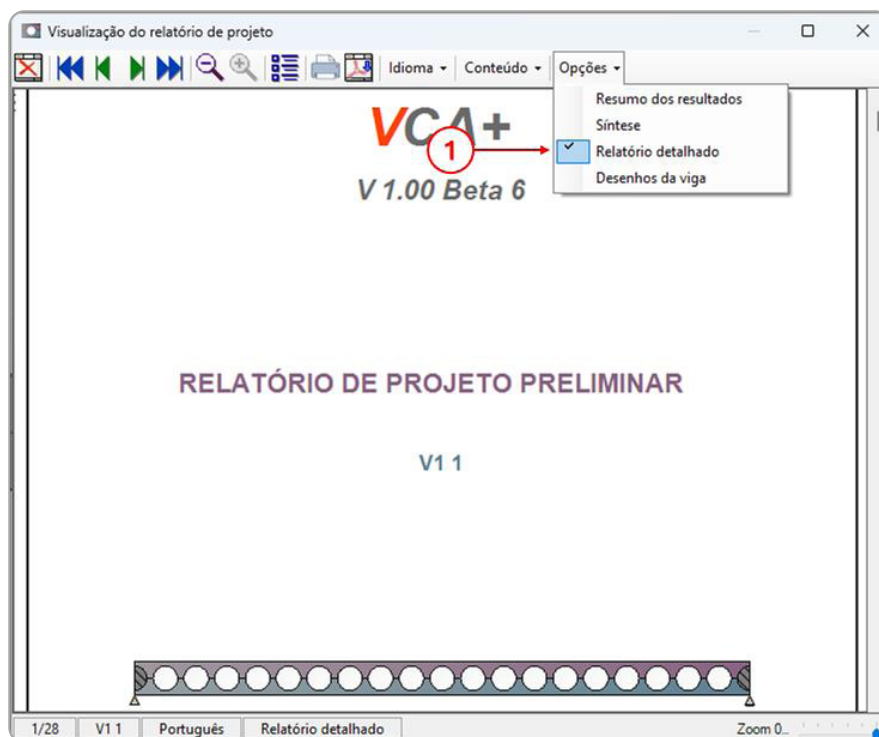


Figura 77 - Relatório de Projeto Preliminar.

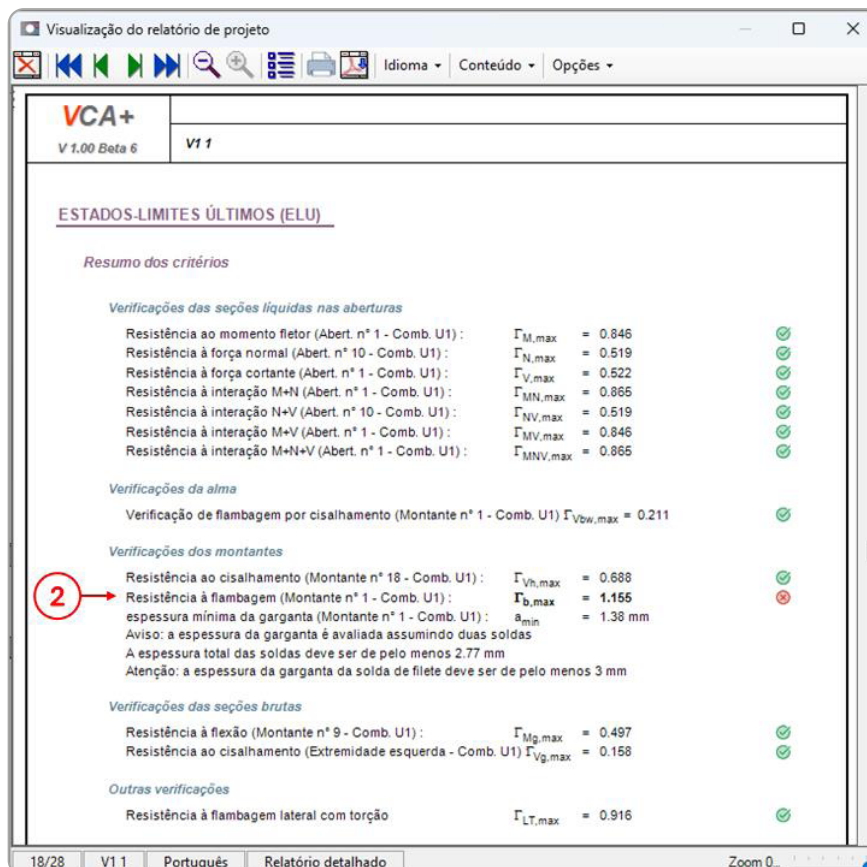



Figura 78 - Resumos dos critérios – Estados-limites últimos (ELU).

6.1.12.1 Enrijecimento do montante de alma

O enrijecimento de montantes de alma é definido na janela **Enrijecimento de montantes de alma** (Figura 79). Clique no botão  para abri-la. Para enrijecer os montantes nº 1 e nº 18, proceda conforme a seguir:

1. clique sobre os montantes de alma nº 1 e nº 18 para enrijecê-los. Uma linha vertical preta é desenhada no centro do montante enrijecido;
2. especifique as dimensões (largura e espessura) e resistência ao escoamento do aço da chapa enrijecedora.



Figura 79 - Configuração do enrijecimento de montantes de alma.

Após a definição dos enrijecedores, clique no botão **OK** no canto inferior direito da janela para prosseguir. Em seguida, abra novamente o **Relatório de projeto preliminar**, conforme mostrado no item 6.1.12. Note que a resistência à flambagem do montante de alma (3) foi verificada com êxito após o enrijecimento dos montantes que estavam com taxa $S_d/R_d > 1,0$.

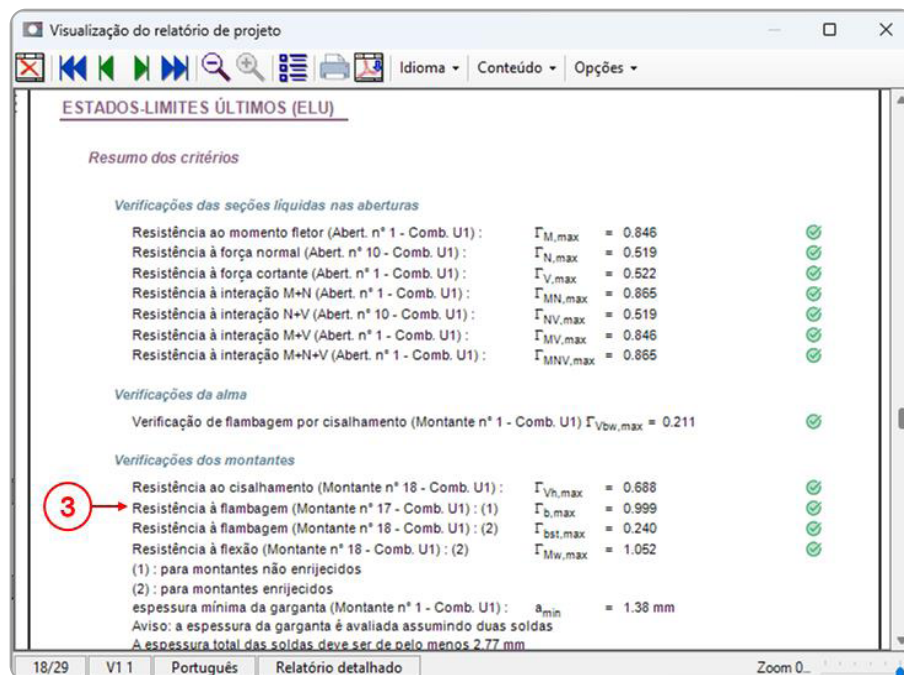



Figura 80 - Verificação da resistência à flambagem do montante de alma – solução com enrijecedores de montante de alma.

6.1.12.2 Preenchimento das aberturas

Alternativamente, a falha do montante de alma à flambagem pode ser resolvida por meio do preenchimento das aberturas adjacentes a ele. Como uma primeira tentativa, serão preenchidas as aberturas adjacentes aos montantes nº 1 e nº 18 em direção às extremidades (esforço cortante crescente). Clique no botão  na barra de ferramentas principal para abrir a janela **Configuração de células** (Figura 81) e siga os passos a seguir:

1. clique sobre as aberturas 1 e 19;
2. no painel **Definição das células selecionadas**, marque a opção **Células preenchidas**.

Após o preenchimento das aberturas, clique no botão **OK** no canto inferior direito da janela para prosseguir. Em seguida, abra novamente o **Relatório de projeto preliminar**, conforme mostrado em 6.1.12. Note que a resistência à flambagem do montante de alma (3) foi verificada com êxito após o preenchimento das aberturas adjacentes aos montantes que estavam com taxa $S_d/R_d > 1,0$.

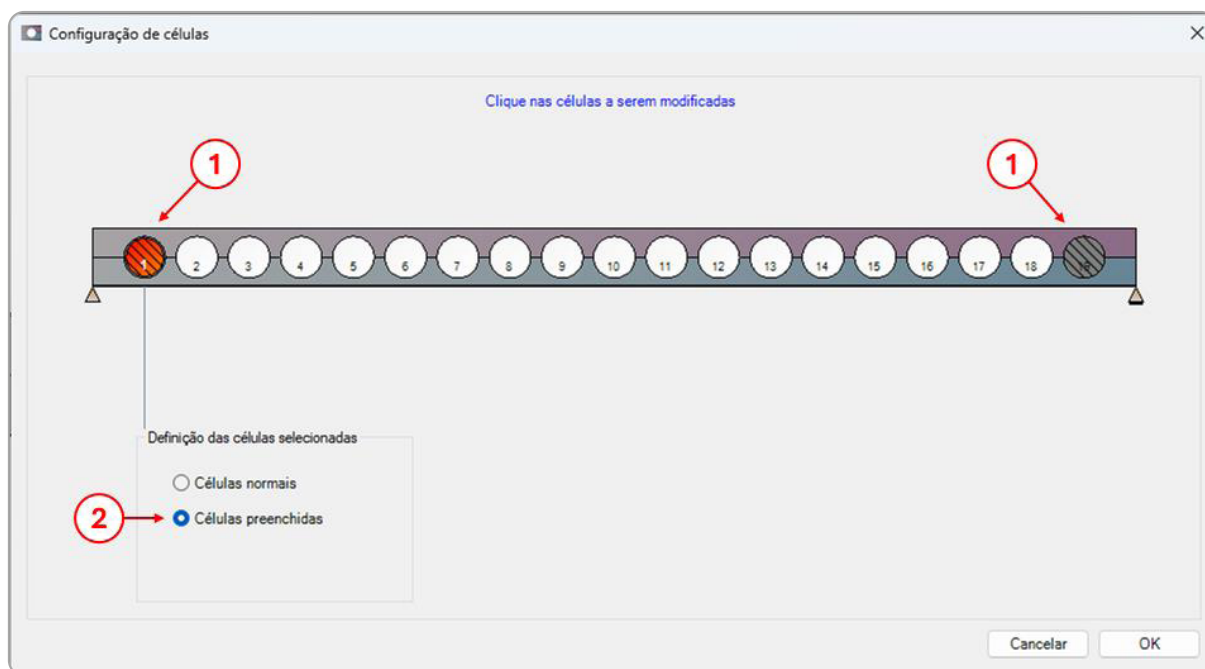


Figura 81 - Configuração de células.

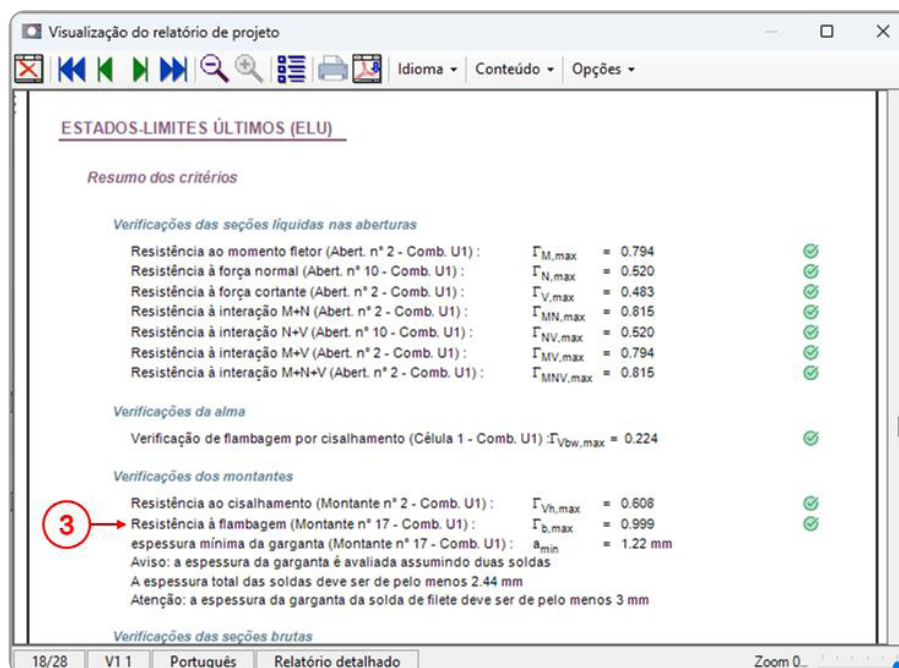



Figura 82 – Verificação da resistência à flambagem do montante de alma – solução com o preenchimento de aberturas.

6.1.12.3 Edição dos parâmetros de corte da viga celular

Os parâmetros de corte da viga celular exercem grande influência nas resistências de cálculo. De acordo com as recomendações da Tabela 6, os parâmetros mais relevantes para a resistência à flambagem do montante de alma são as relações e/a_0 e a_0/d , sendo a resistência diretamente proporcional à primeira e inversamente proporcional à segunda.

Portanto, a primeira tentativa será aumentar a relação e/a_0 da viga celular. Clique no botão  na barra de ferramentas principal para abrir a janela **Corte das vigas** e siga os seguintes passos:

1. marque a caixa de seleção **Espaçamento das células** e informe o valor **$e = 420$ mm**;
2. clique no botão **Buscar as soluções**;
3. clique sobre a solução para visualizar o croqui do corte na região inferior da janela.

Após realizada a modificação, clique no botão **OK** no canto inferior direito da janela para prosseguir. Em seguida, abra novamente o **Relatório de projeto preliminar**, conforme mostrado no item 6.1.12. Note que a resistência à flambagem do montante de alma (3) ainda não foi verificada com êxito após o aumento da relação e/a_0 , com taxa $S_d/R_d = 1,045$.

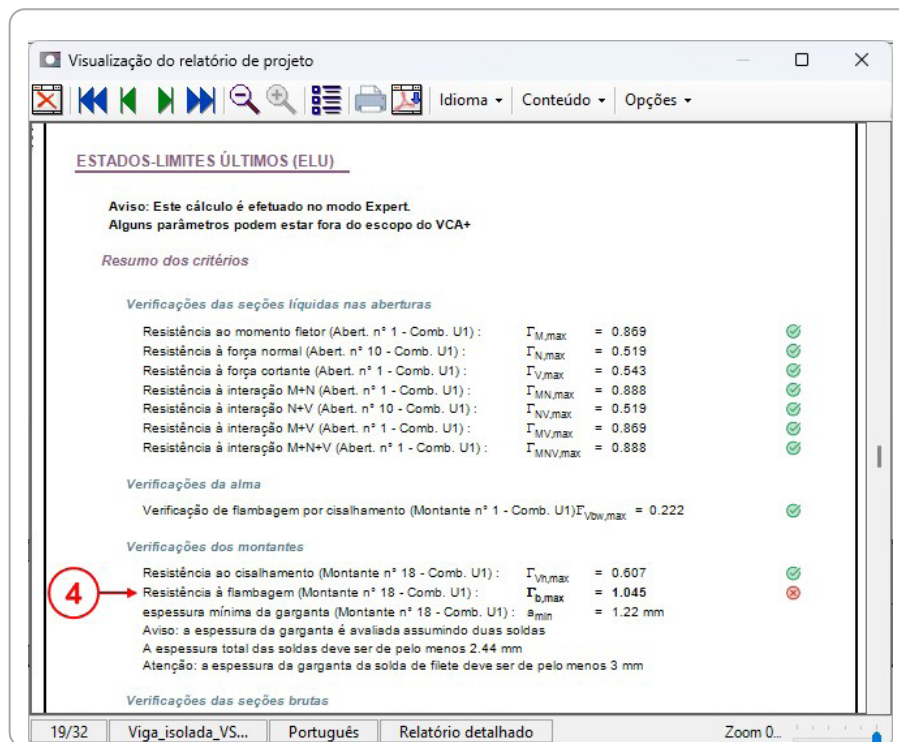



Figura 83 – Resultados após a modificação da relação e/a_0 .

Se não for possível aumentar o espaçamento das células, o segundo parâmetro mais relevante à resistência à flambagem deve ser ajustado: reduzir o diâmetro das aberturas para aumentar a resistência do montante de alma, conforme a Tabela 6.

Clique novamente no botão  na barra de ferramentas principal para abrir a janela Corte das vigas e siga os seguintes passos:

1. marque a caixa de seleção **Diâmetro das células** e informe o valor $a_0 = 300 \text{ mm}$;
2. clique no botão **Buscar as soluções**;
3. clique sobre a solução para visualizar o croqui do corte na região inferior da janela.

Após realizada a modificação, clique no botão **OK** no canto inferior direito da janela para prosseguir. Em seguida, abra novamente o **Relatório de projeto preliminar**. Note que a resistência à flambagem do montante de alma (4) foi verificada com êxito após a redução da relação a_0/d , com taxa $S_d/R_d = \Gamma_{b,max} = 0,845$.

6.2 Viga celular com perfil soldado VCS

Deseja-se verificar a mesma viga de cobertura do exemplo 6.1, porém com um perfil do catálogo VCS, de vigas celulares soldadas.

O catálogo VS apresenta perfis com proporções geométricas adequadas a vigas de alma cheia, mas nem sempre ideais para vigas celulares, em razão das diferenças entre seus mecanismos resistentes.

Com o objetivo de otimizar o desempenho e o consumo de aço das vigas celulares, foi proposto um catálogo de viga celular soldada, VCS, para aplicação em vigas celulares isoladas e mistas. O catálogo VCS traz perfis com faixas de esbeltez das chapas não presentes no catálogo VS, principalmente a razão entre a altura d e a largura da mesa b_f .

Os principais parâmetros são mostrados a seguir:

Parâmetros gerais:

vão horizontal da viga:	8 m
comprimento destravado:	2 m (distância entre terças)
apoios de extremidade:	viga simplesmente apoiada
perfil base:	VCS 350x30 (simétrico)
aço:	ASTM A572 Gr.50

Corte da viga:

número de células:	$n = 19$	
diâmetro das células:	$a_0 = 300 \text{ mm}$	$(a_0/d = 0,86)$
espaçamento das células:	$e = 420 \text{ mm}$	$(e/a_0 = 1,40)$
altura total do perfil celular:	$H_t = 450 \text{ mm}$	$(H_t/d = 1,29)$

Casos de carga:

Idênticos aos do exemplo 6.1.

Combinações últimas:

Idênticas às do exemplo 6.1.

6.2.1 Criar uma viga a partir de um caso existente

O VCA+ possui a função de criar uma cópia de uma viga existente. Abra o arquivo do exemplo 6.1 e clique com o botão direito na viga correspondente na barra de abas para seleção das vigas. Selecione a opção **Duplicar viga**.

6.2.2 Seção transversal

Troque o perfil da viga na janela **Seção transversal**, clicando no botão  na barra de ferramentas principal. Selecione o perfil VCS 350x30 do catálogo VCS e o aço ASTM A572 Gr.50, conforme mostrado na Figura 84.

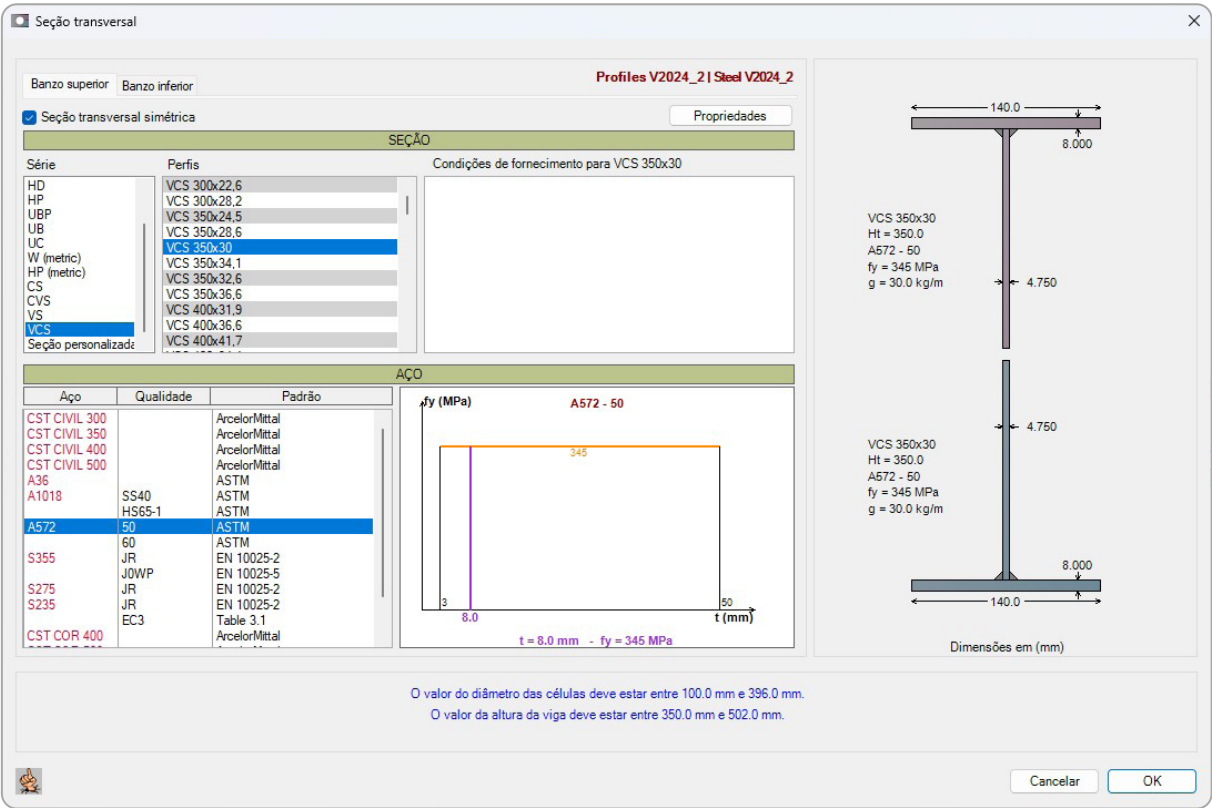

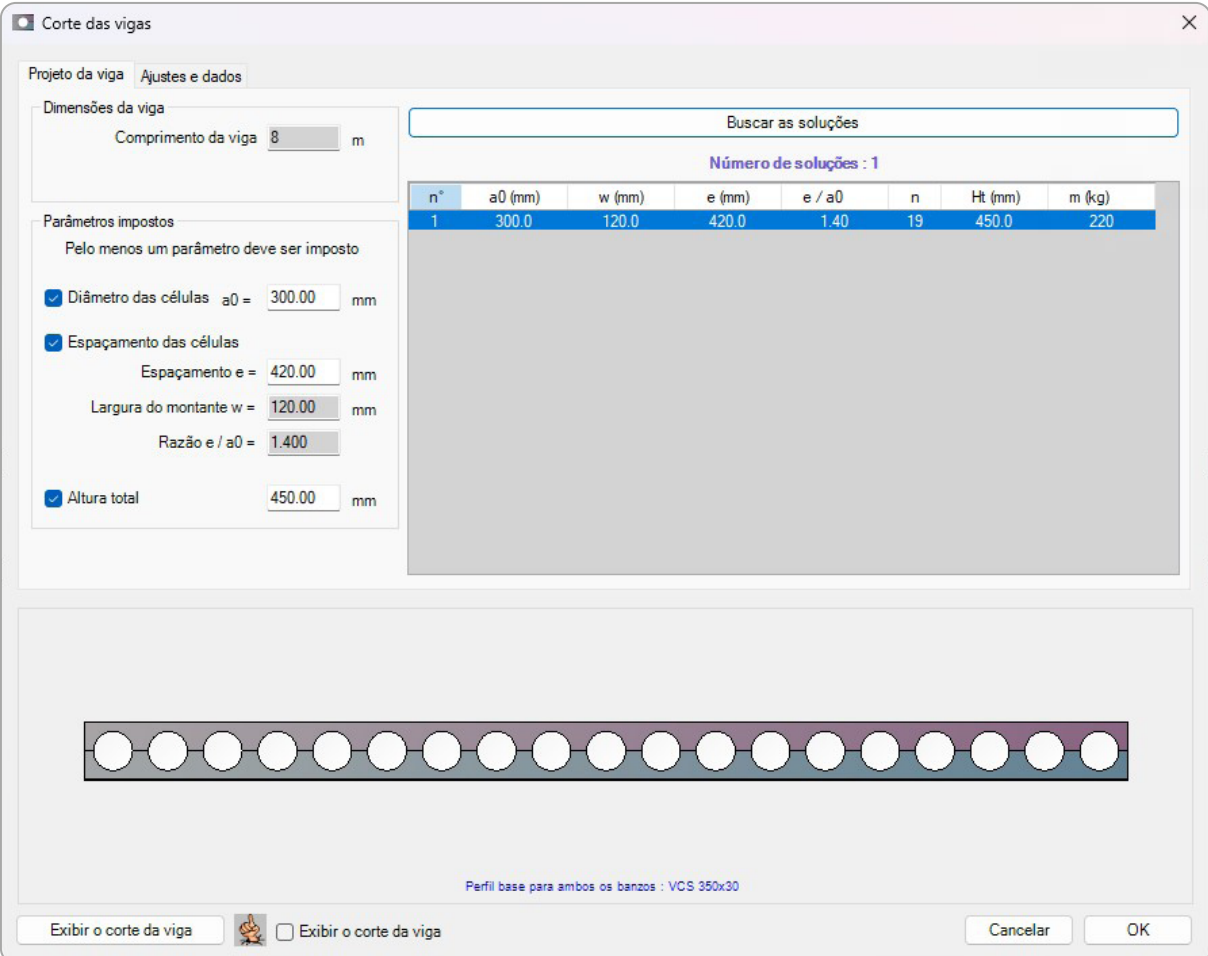


Figura 84 – Configuração do perfil VCS 350x30.

6.2.3 Corte da viga

Clique no botão  na barra de ferramentas principal para abrir a janela **Corte das vigas** e configure os parâmetros impostos, conforme mostrado na Figura 85.



Corte das vigas

Projeto da viga | Ajustes e dados

Dimensões da viga

Comprimento da viga: 8 m

Parâmetros impostos

Pelo menos um parâmetro deve ser imposto


- ☒ Diâmetro das células $a_0 = 300.00$ mm
- ☒ Espaçamento das células
- Espaçamento $e = 420.00$ mm
- Largura do montante $w = 120.00$ mm
- Razão $e / a_0 = 1.400$
- ☒ Altura total: 450.00 mm

Buscar as soluções

Número de soluções: 1

n°	a_0 (mm)	w (mm)	e (mm)	e / a_0	n	H_t (mm)	m (kg)
1	300.0	120.0	420.0	1.40	19	450.0	220


Perfil base para ambos os lados: VCS 350x30

Exibir o corte da viga  ☐ Exibir o corte da viga

Cancelar OK

Figura 85 – Configuração de corte da viga celular.

6.2.4 Resultados – Relatório de Projeto Preliminar

Após a correta configuração de todos os parâmetros apresentados nos itens 6.2.1 a 6.2.3, clique no botão  na barra de ferramentas principal para gerar o **Relatório de Projeto Preliminar**. No menu **Opções**, marque o item **Relatório Detalhado** (1).

Em seguida, vá até a página onde os **resumos dos critérios** dos **ELU** são apresentados (Figura 86). Note que todos os critérios foram verificados com êxito.

É interessante observar que a solução com o perfil VCS 350x30, com massa linear de 30 kg/m, consome 5 kg/m a menos que a solução com o perfil VS 350x35 do exemplo 6.1. A utilização de um perfil da série VCS, cujas relações geométricas são mais apropriadas para vigas celulares, possibilitou uma economia de aço de 14% em relação à solução com um perfil da série VS.

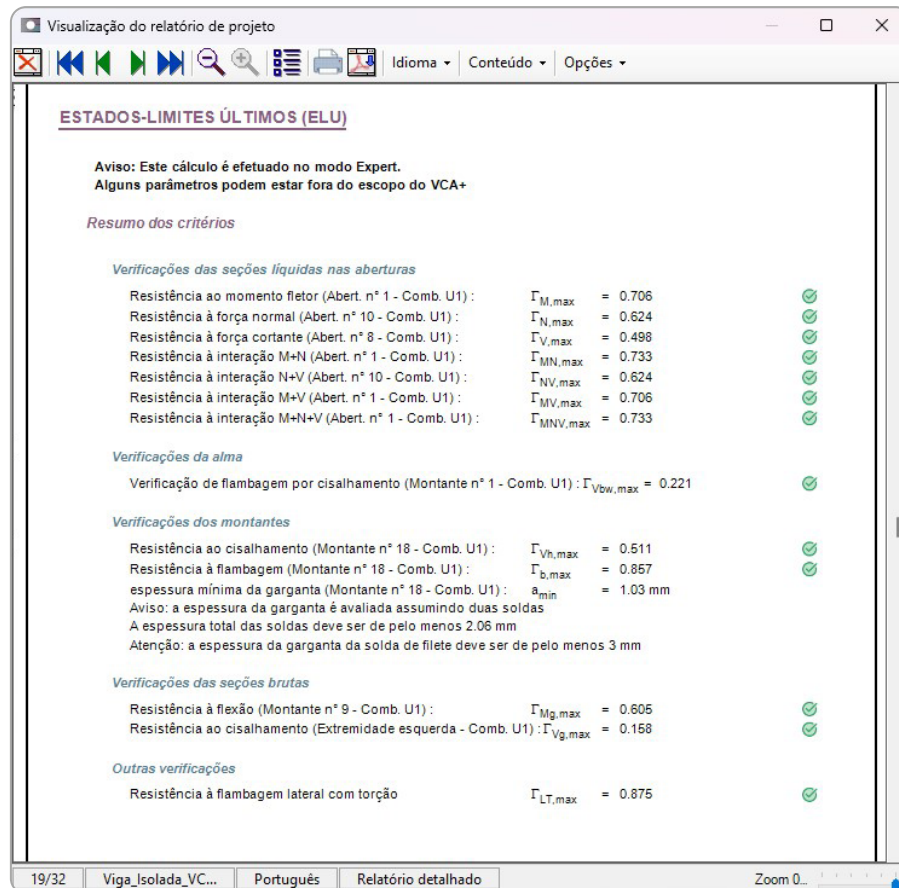


Figura 86 – Relatório de Projeto Preliminar (exemplo 6.2).

6.3 Viga celular mista com perfil duplamente simétrico

Neste exemplo, é dimensionada 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 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 (α_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 $\Psi_2 = 0,6$)

6.3.1 Criar 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 87), 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.

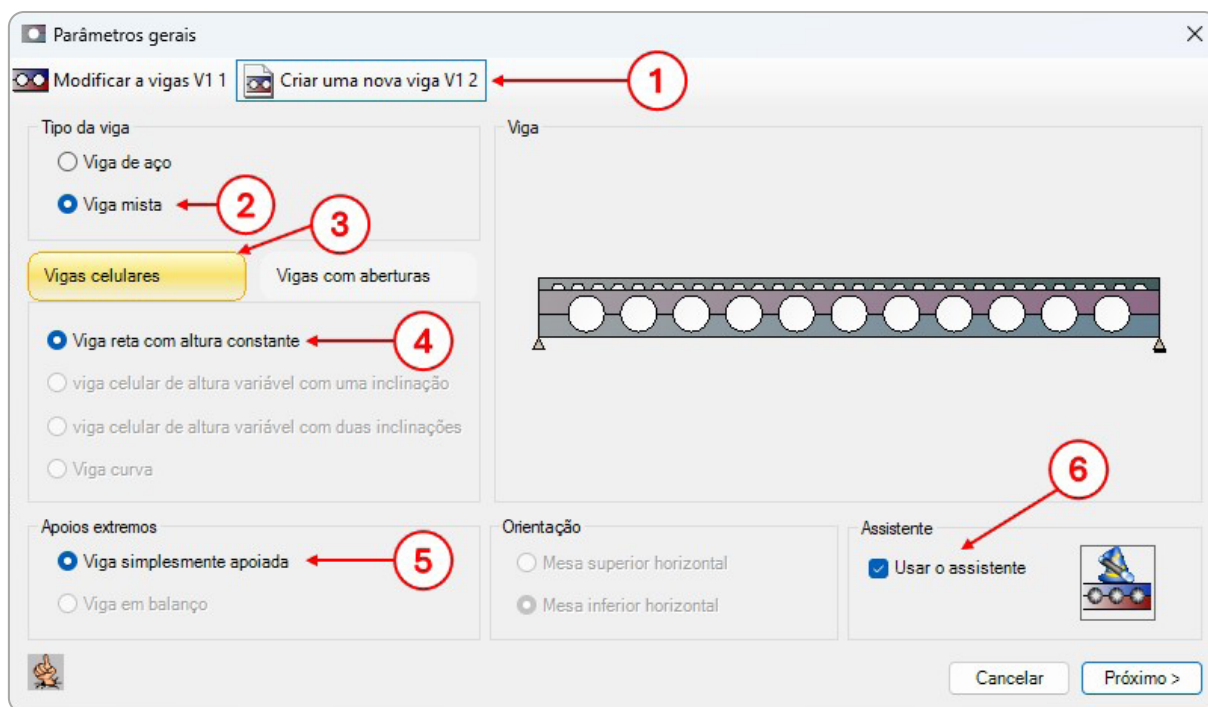


Figura 87 – Configuração da janela Parâmetros gerais.

6.3.2 Identificação do projetista

Opcionalmente, é possível identificar o projetista na janela **Identificação** (Figura 88). Os campos desta janela podem ser preenchidos parcialmente, ou simplesmente deixados em branco. As informações inseridas serão utilizadas no **Relatório preliminar de cálculo**.

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

A imagem mostra a janela 'Identificação' de um software de projeto. No topo, há uma barra de ferramentas com um botão 'Identificação'. Abaixo, há uma seção com cinco campos de texto: 'Usuário', 'Empresa', 'Projeto', 'Identificação da viga' (contendo 'V1 2') e 'Comentário'. Abaixo, há uma seção 'Logo para o relatório preliminar' com o texto 'Nenhum logotipo personalizado será exibido no relatório' e um botão 'Definir o logotipo personalizado'. No canto inferior direito, há três botões: '< Anterior', 'Cancelar' e 'Próximo >'.

Figura 88 – Janela Identificação.

6.3.3 Vão e posição da viga

Na janela **Vão e posição da viga** (Figura 89), 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**.

A imagem mostra a interface de uma janela de software intitulada "Vão e posição da viga". A janela contém os seguintes elementos:

- Geometria da viga:** Um campo de texto rotulado "Vão horizontal da viga" com o valor "15" e a unidade "m". Um círculo vermelho com o número "1" aponta para este campo.
- Tipo de viga:** Duas opções de rádio: "Viga intermediária" (selecionada) e "Viga de borda". Um círculo vermelho com o número "2" aponta para a opção "Viga intermediária".
- Espaçamentos:** Campos para "Do lado esquerdo" (L1 = 2.5 m) e "Do lado direito" (L2 = 2.5 m). Um círculo vermelho com o número "3" aponta para o campo "Do lado direito".
- Larguras máximas:** Uma caixa de seleção "Abertura na laje" (desselecionada) e campos para "No lado esquerdo" (Lmax1 = 0.0 m) e "No lado direito" (Lmax2 = 0.0 m).
- Diagramas:** Do lado direito, há dois diagramas. O superior mostra uma viga entre duas outras, com distâncias L_1 e L_2 . O inferior mostra uma viga com uma abertura na laje, com a largura máxima L_{max} .
- Botões:** No rodapé, há botões "< Anterior", "Cancelar" e "Próximo >".

Figura 89 – Configuração da janela Vão e posição da viga.

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

6.3.4 Seção transversal

O perfil base e o tipo de aço são configurados na janela **Seção transversal** (Figura 90). Com base nos dados do problema, configure as opções conforme a seguir.

Marque a caixa de seleção **Seção transversal simétrica**. O perfil escolhido será automaticamente adotado para os banzos superior e inferior.

1. Selecione a série **VS**.
2. Selecione o perfil base **VS 600x111**.
3. Escolha o aço **ASTM A572 Gr. 50**.

4. Clique no botão **Propriedades** para visualizar as propriedades detalhadas do perfil.

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

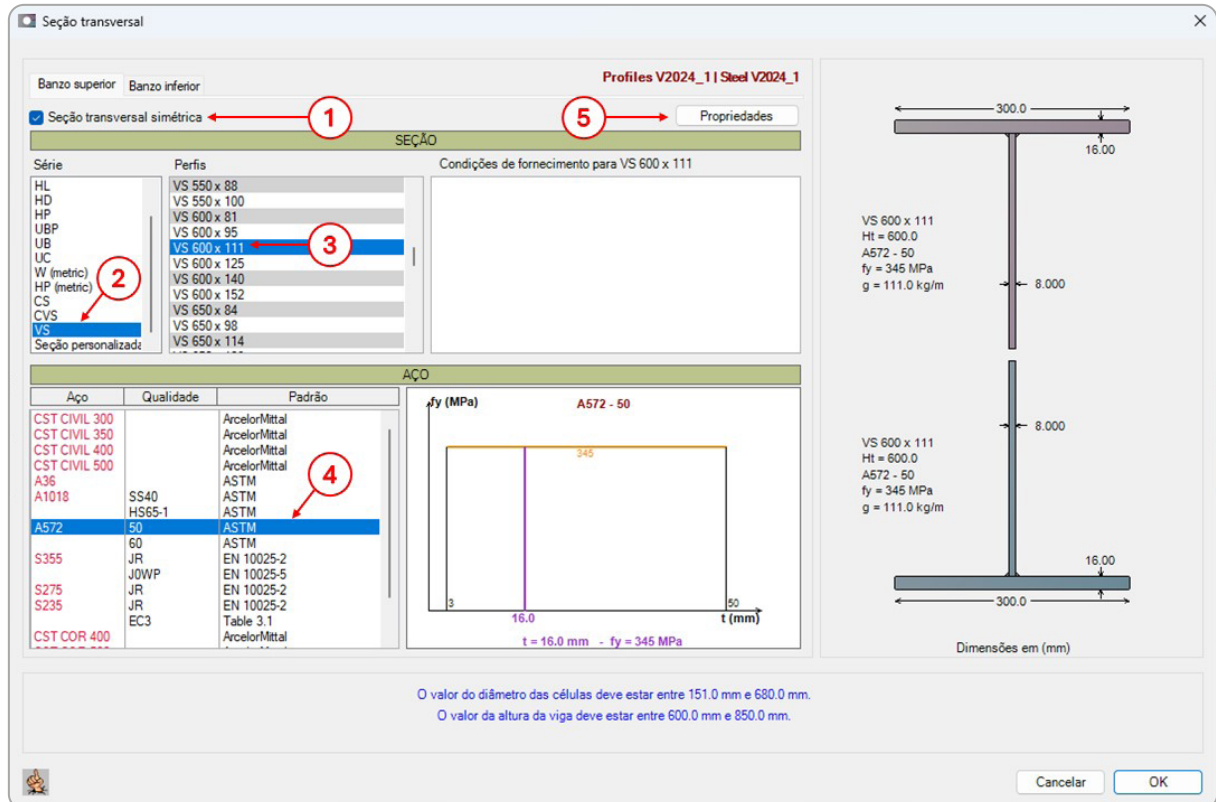


Figura 90 – Dados de entrada na janela Seção transversal (exemplo 6.3).

6.3.5 Corte da viga

A configuração do corte da viga celular é realizada na janela **Corte das vigas** (Figura 91). O VCA+ busca automaticamente as soluções de corte possíveis para os parâmetros impostos pelo usuário, sempre respeitando o escopo das vigas celulares definido nas **Opções do software**. O usuário deve impor pelo menos um dos três parâmetros: diâmetro das células (a_0), espaçamento das células (e) e 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.

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

Corte das vigas

Projeto da viga | Ajustes e dados

Dimensões da viga
Comprimento da viga: 15 m

Parâmetros impostos
Pelo menos um parâmetro deve ser imposto

☒ Diâmetro das células $a_0 = 650.00$ mm

☒ Espaçamento das células
Espaçamento $e = 800.00$ mm

Largura do montante $w = 150.00$ mm

Razão $e / a_0 = 1.231$

☐ Altura total: 837.43 mm

Buscar as soluções

Número de soluções : 1

n°	a_0 (mm)	w (mm)	e (mm)	e / a_0	n	H_t (mm)	m (kg)
1	650.0	150.0	800.0	1.23	18	837.4	1067

Perfil base para ambos os banzos : VS 600 x 81

Exibir o corte da viga ☐ Exibir o corte da viga

< Anterior Cancelar Próximo >

Figura 91 – Dados e opções na janela Corte das vigas (exemplo 6.3).

6.3.6 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 **Próximo** no canto inferior da janela para continuar.

6.3.6.1 Laje

A configuração da laje é feita na aba **Laje** da **janela Laje de concreto** (Figura 92), 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 92.

Figura 92 – Configuração da aba Laje de concreto.

Para a correta definição da espessura total da laje, deve-se atentar às limitações da NBR 8800 (ABNT, 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;
- cobrimento 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 cobrimento de concreto de pelo menos 10 mm acima do conector.

6.3.6.2 Steel deck

Quando o tipo de laje for definido como **Laje com fôrma de aço incorporada**, a aba **Steel deck** é habilitada para edição (Figura 93). 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**;

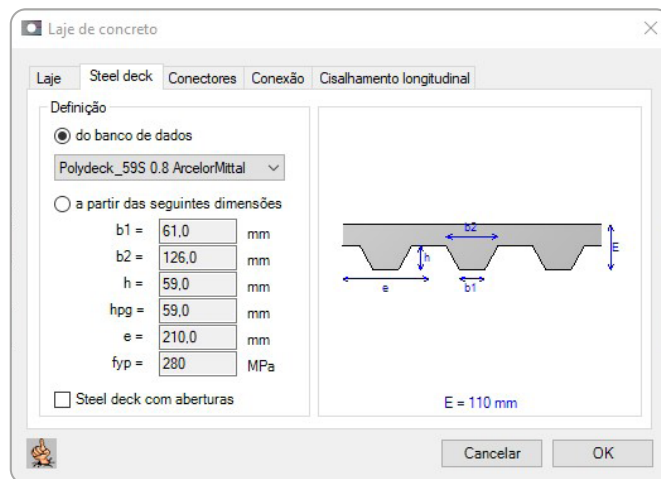


Figura 93 – Configuração da aba Steel deck.

6.3.6.3 Conectores

Na versão 1.0, o VCA+ suporta apenas conectores de cisalhamento do tipo stud soldado (Figura 94).

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

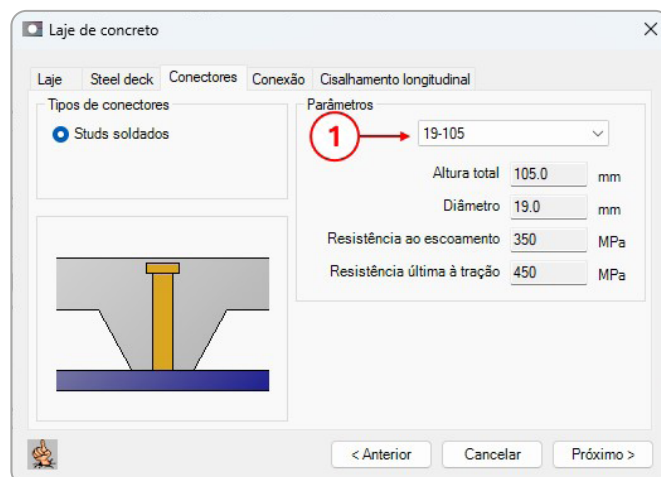


Figura 94 – Configuração da aba Conectores.

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.

6.3.6.4 Conexão

A disposição dos conectores de cisalhamento é definida na aba **Conexão** (Figura 95). 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**.

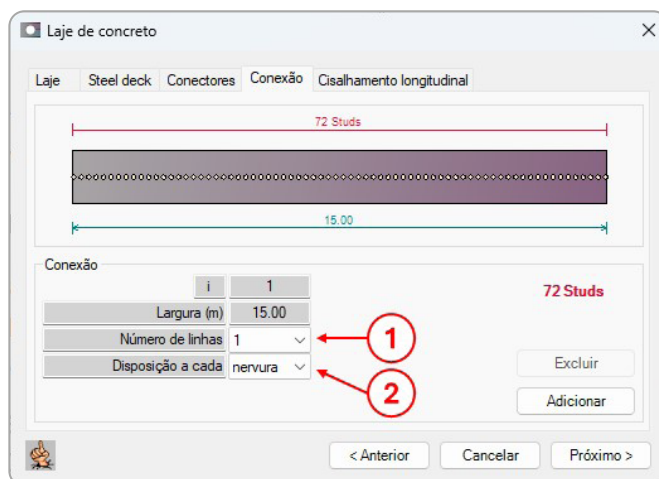


Figura 95 – Parâmetros da disposição dos conectores na aba Conexão (exemplo 6.3).

6.3.6.5 Cisalhamento longitudinal

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 96.

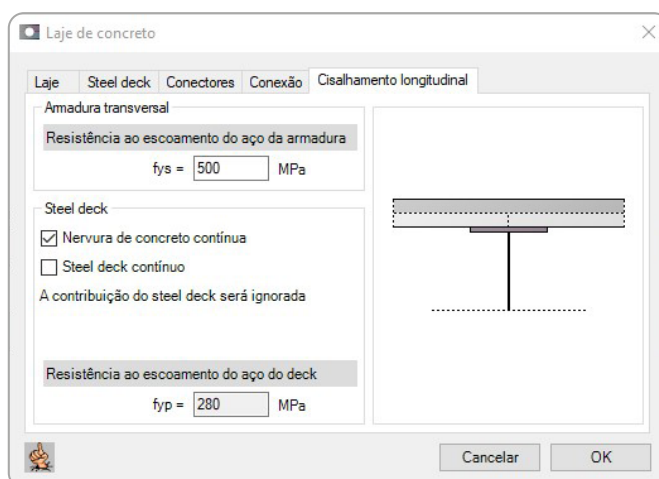


Figura 96 – Parâmetros para a verificação ao cisalhamento longitudinal.

6.3.7 Configuração de células

Na janela **Configuração de células** (Figura 97) 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.

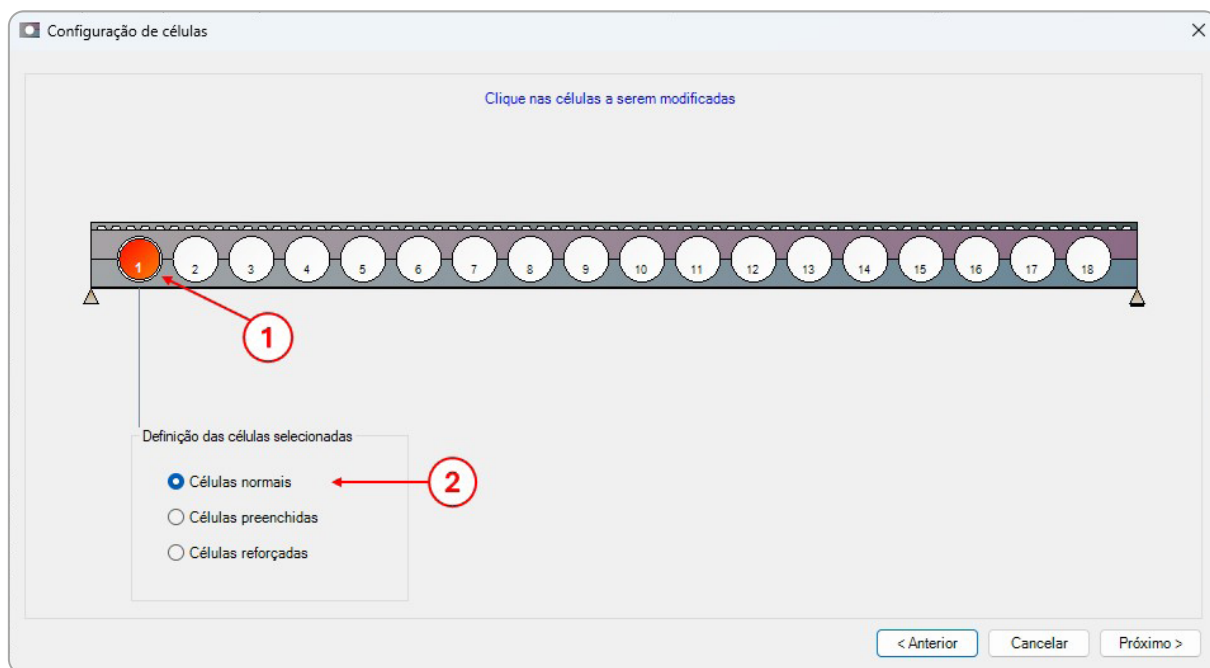


Figura 97 – Opções na janela Configuração de células (exemplo 6.3).

6.3.8 Enrijecimento de montantes de alma

O VCA+ possibilita a especificação de enrijecedores nos montantes de alma (Figura 98). 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 ao escoamento do aço do enrijecedor.

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

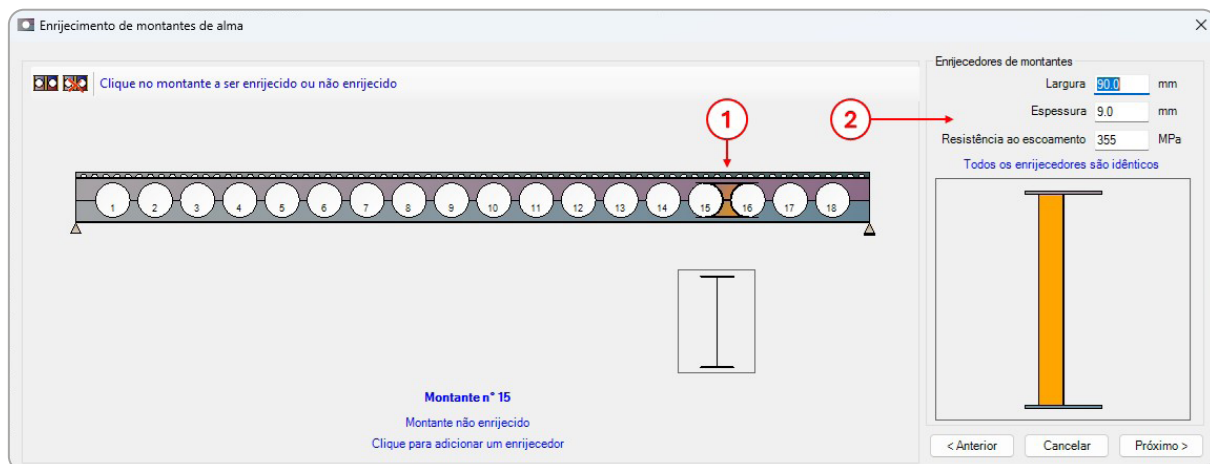


Figura 98 – Definição dos parâmetros para os enrijecedores de montante de alma (exemplo 6.3).

6.3.9 Contenção lateral da viga

A configuração de contenção lateral é feita na janela **Contenção lateral da viga** (Figura 99). 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.

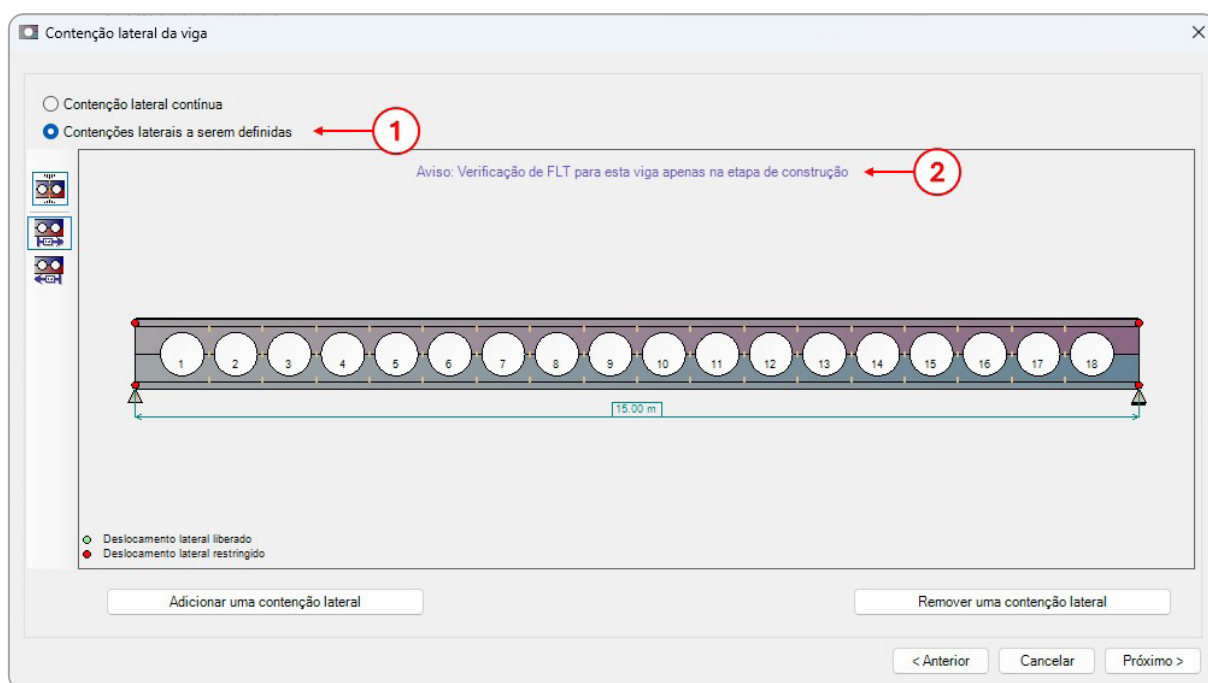


Figura 99 – Configuração da janela Contenção lateral da viga (exemplo 6.3).

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

6.3.10 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.

6.3.10.1 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 100):

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**.

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

- ☒ G Ações permanentes
- ☐ Q1 Sobrecarga 1
- ☐ Q2 Sobrecarga 2
- ☐ QC Cargas de construção

Cargas distribuídas

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientação
1	0.0	6.372	15.00	6.372	Vertical
2					
3					
4					

Excluir Adicionar

Cargas concentradas

i	x (m)	F (kN)	Orientação
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Excluir Adicionar

Forças axiais de extremidade

Força 0.0 kN

Posição Mesa superior

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 0.0 kN.m

Lado direito 0.0 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 2.5 m

Carga uniforme 1.000 kN/m²

Orientação Vertical

Força resultante 37.5 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 66.54 kN

Apoio direito 66.54 kN

Soma 133.1 kN

Diagrama de uma viga com 17 pontos numerados e uma carga distribuída aplicada.

Cancelar OK

Figura 100 – Janela para a definição dos casos de carregamento – ações permanentes.

6.3.10.2 Sobrecarga Q1

Para inserir a sobrecarga Q1, siga os seguintes passos (Figura 101):

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

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

☐ G Ações permanentes

☒ Q1 Sobrecarga 1

☐ Q2 Sobrecarga 2

☐ QC Cargas de construção

Cargas distribuídas

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientação
1					
2					
3					
4					

Excluir Adicionar

Cargas concentradas

i	x (m)	F (kN)	Orientação
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Excluir Adicionar

Forças axiais de extremidade

Força 0.0 kN

Posição Mesa superior

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 0.0 kN.m

Lado direito 0.0 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 2.5 m

Carga uniforme 3.000 kN/m2

Orientação Vertical

Força resultante 112.5 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 56.25 kN

Apoio direito 56.25 kN

Soma 112.5 kN

Cancel OK

Figura 101 – Janela para a definição dos casos de carregamento – sobrecargas.

6.3.10.3 Carga de construção QC

Para inserir a carga de construção QC (Figura 102):

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

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

- ☐ G Ações permanentes
- ☐ Q1 Sobrecarga 1
- ☐ Q2 Sobrecarga 2
- ☒ QC Cargas de construção

Cargas distribuídas

i	x1 (m)	q1 (kN/m)	x2 (m)	q2 (kN/m)	Orientação
1					
2					
3					
4					

Cargas concentradas

i	x (m)	F (kN)	Orientação
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Forças axiais de extremidade

Força 0.0 kN

Posição Mesa superior

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 0.0 kN.m

Lado direito 0.0 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 2.5 m

Carga uniforme 1.000 kN/m²

Orientação Vertical

Força resultante 37.5 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 18.75 kN

Apoio direito 18.75 kN

Soma 37.5 kN

Diagrama

Diagrama de uma viga com 18 nós e uma carga distribuída aplicada.

Figura 102 – Janela para a definição dos casos de carregamento – cargas de construção.

6.3.11 Coeficientes de ponderação e fatores de combinação

Os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação podem ser alterados na janela **Coeficientes Gama** (Figura 103). O VCA+ carrega automaticamente os valores padrão em conformidade com a NBR 8800 (ABNT, 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 103 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	Laje	Incêndio
γ_{a1}	= 1.100	
γ_{a2}	= 1.350	

Cancelar OK

Figura 103 – Configuração dos coeficientes de ponderação e fatores de combinação.

6.3.12 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 104), 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.

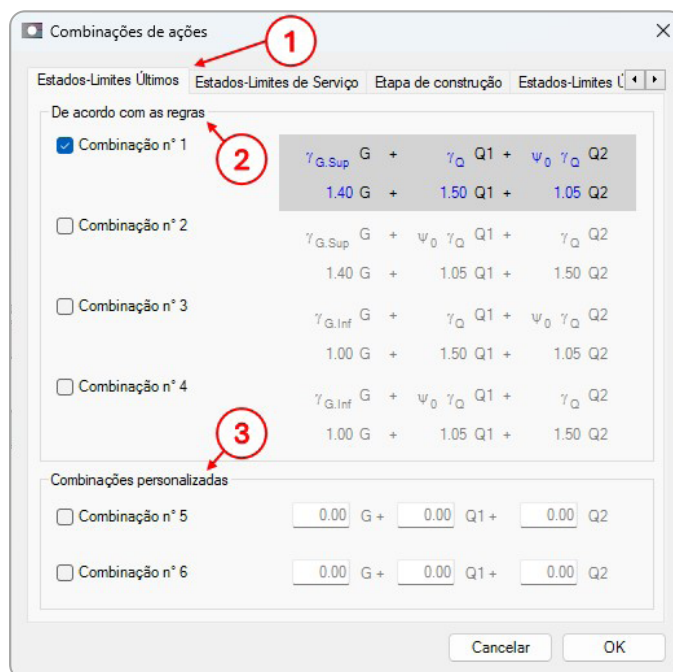



Figura 104 – Definição das combinações de ações (exemplo 6.3).

6.3.13 Resultados – Relatório de Projeto Preliminar

Após a correta configuração de todos os parâmetros apresentados nos itens 6.3.1 a 6.3.12, clique no botão  na barra de ferramentas principal para gerar o **Relatório de Projeto Preliminar** (Figura 105). 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 106). 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.

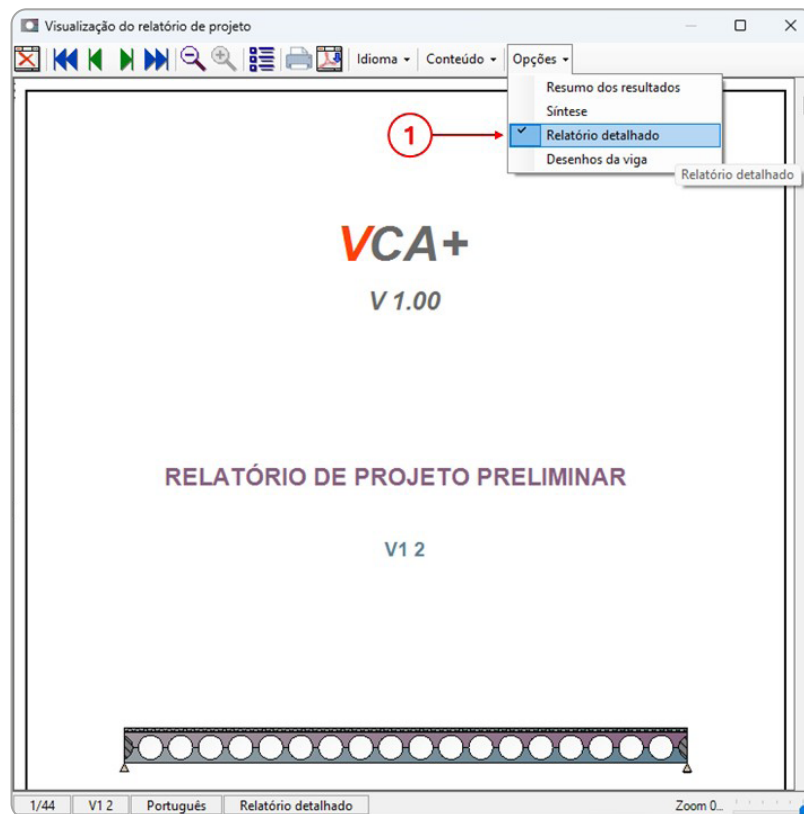


Figura 105 – Relatório de Projeto Preliminar (exemplo 6.3).

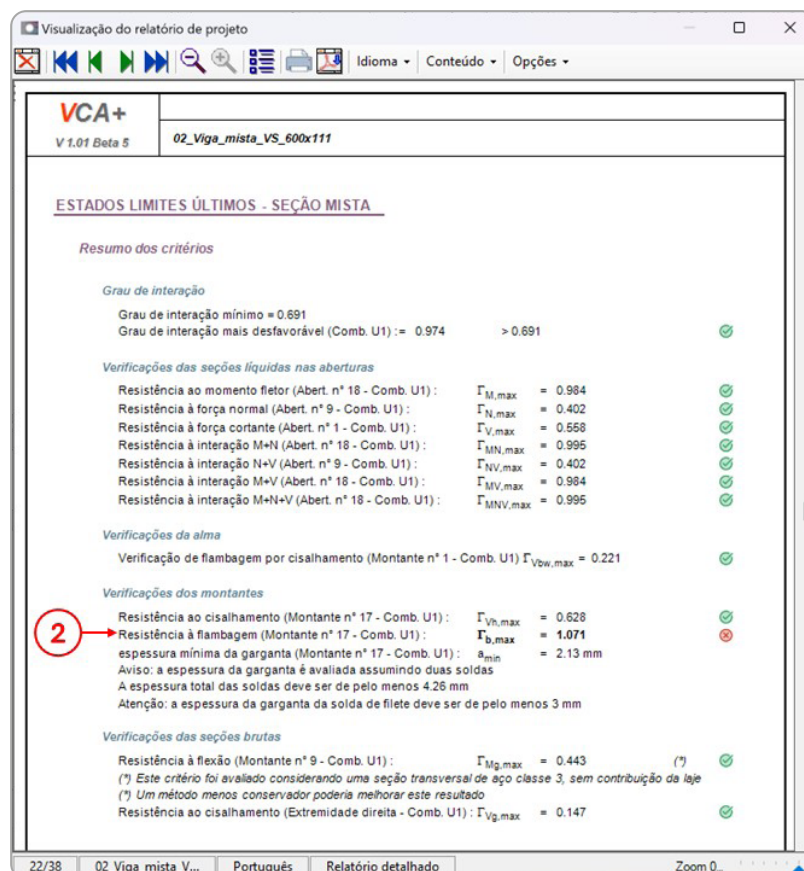



Figura 106 – Resumos dos critérios – Estados-limites últimos (ELU).

6.3.13.1 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 107).

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.

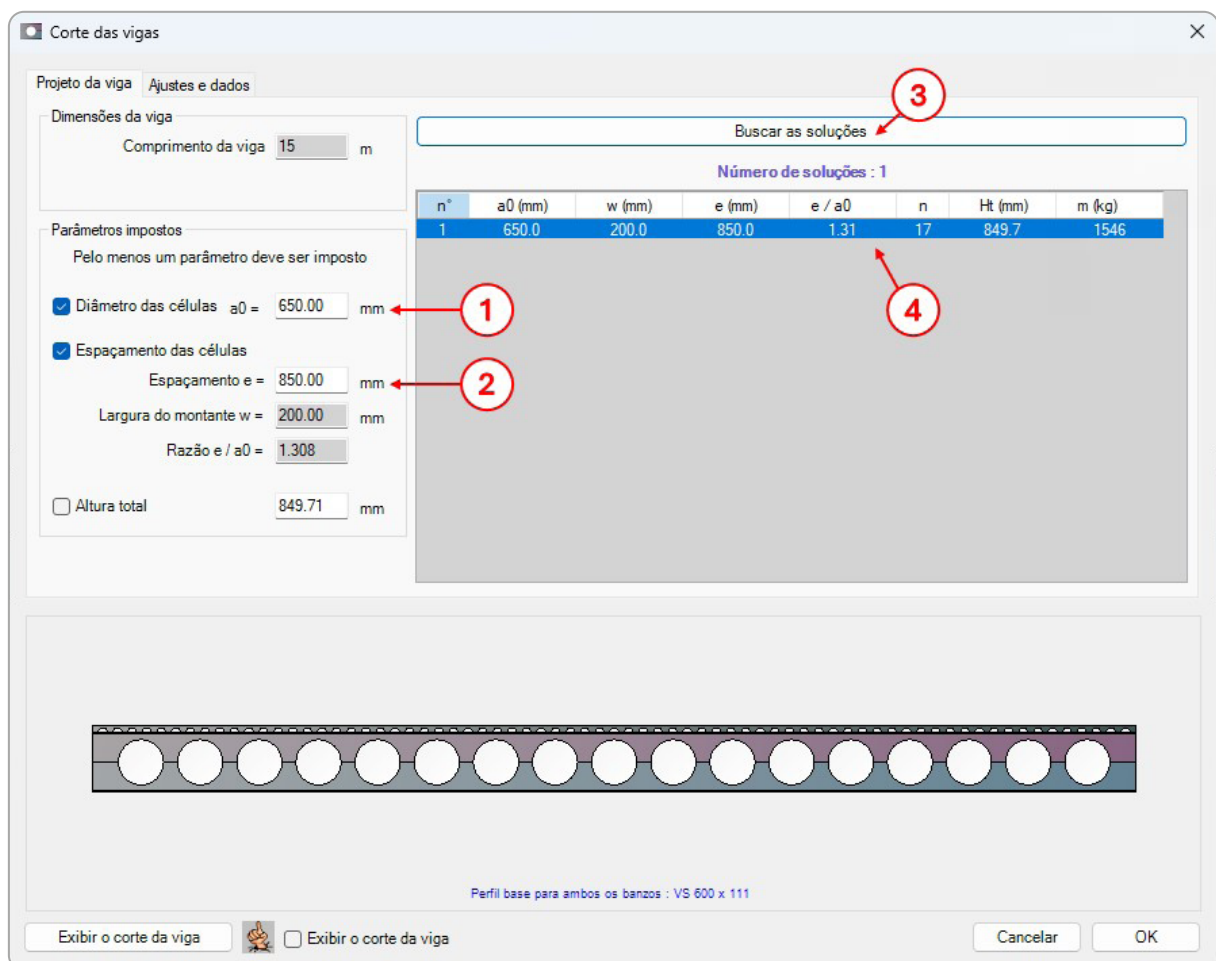


Figura 107 – Configuração do enrijecimento de montantes de alma.

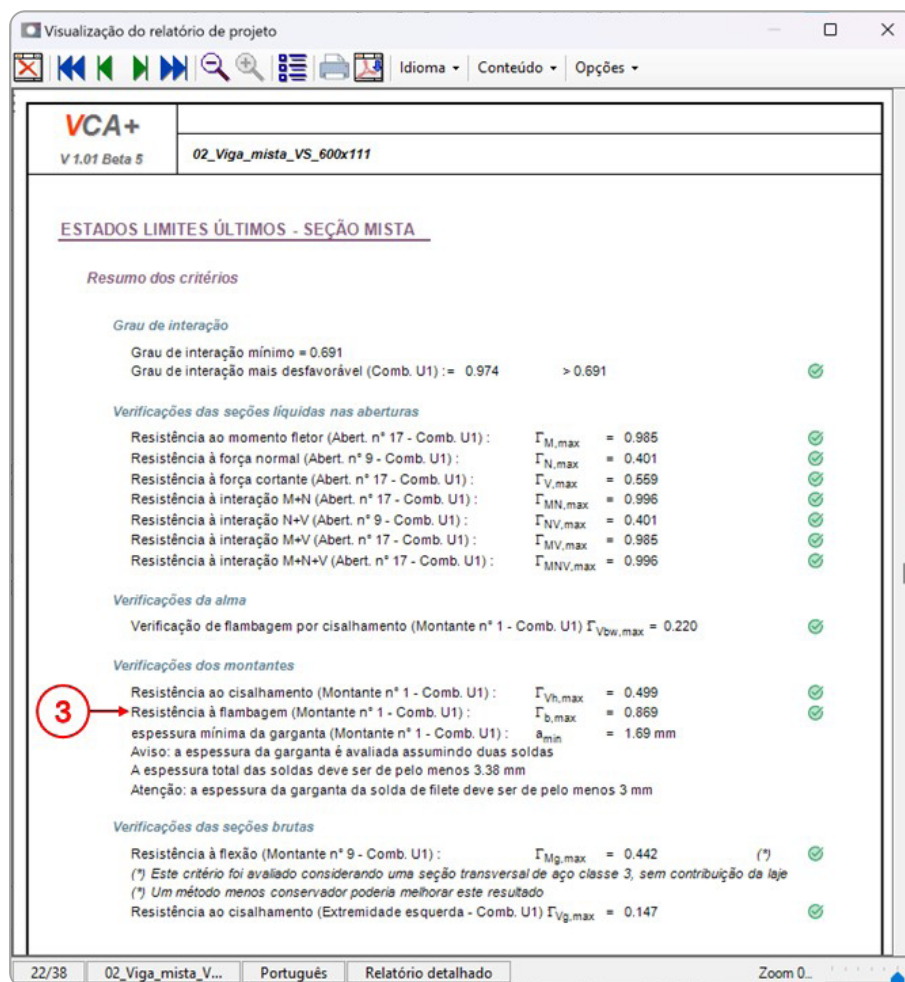


Figura 108 – Verificação da resistência à flambagem do montante de alma – solução com enrijecedores de montante de alma.

6.3.13.2 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 109, as flechas para as combinações quase-permanente e rara foram $L/466$ e $L/378$, respectivamente.

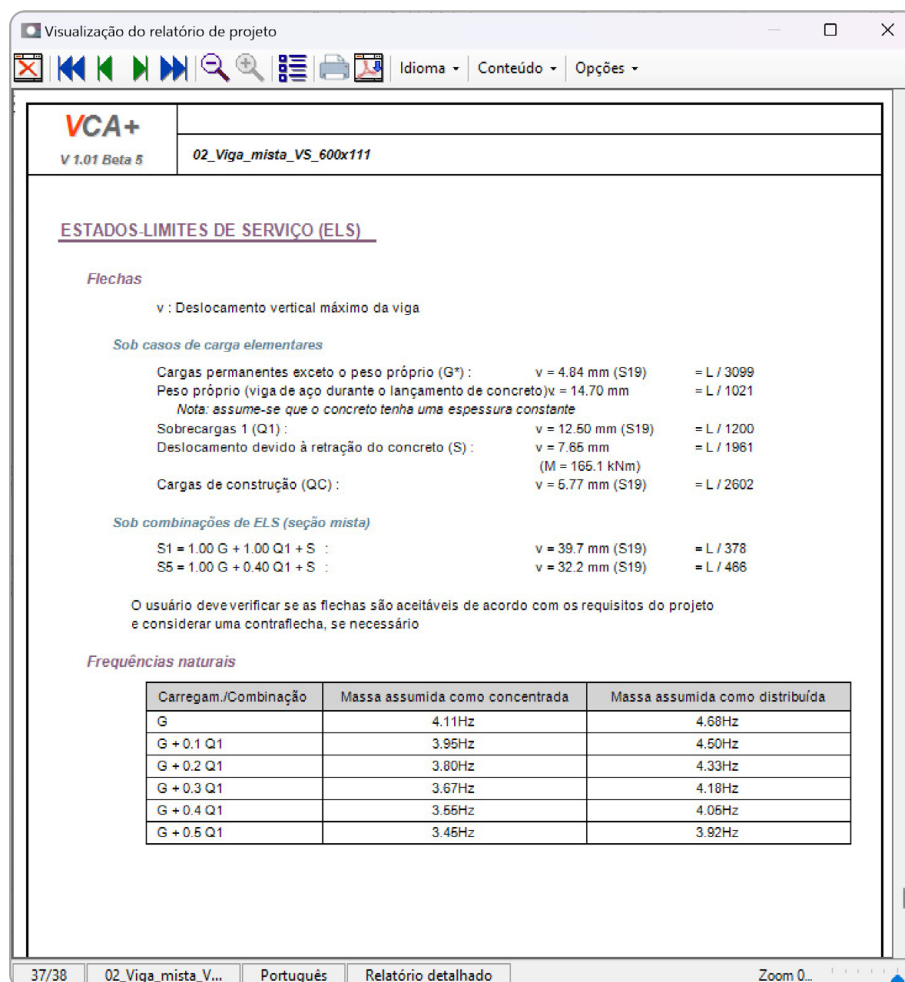


Figura 109 – Resultados do estado-limite de serviço de deformações excessivas.

6.4 Viga celular mista – comparativo entre os perfis VS e VCS

Para demonstrar o potencial do catálogo VCS proposto, a viga mista do exemplo 6.3 foi resolvida para quatro soluções distintas, a saber, os perfis mais leves possíveis das séries de 600 e 550 mm de altura dos catálogos VS e VCS, conforme mostrado na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente.

Note que para os perfis da série 600 (Tabela 7), ambos atendem aos critérios de ELU e ELS. Porém, a solução com perfil VCS 600x85 foi 23% mais leve do que o perfil VS 600x111.

Para os perfis da série 550 (Tabela 8), nem o VS 550x88 nem o VCS 550x63 atendem aos critérios de flecha para vigas de piso segundo a NBR 8800 (ABNT, 2024), e necessitariam de contraflecha. Entretanto, a solução com VCS 550x63, além de ser 29% mais leve do que o perfil VS, requereria uma contraflecha menor (consumiria menos energia).

Finalmente, compararam-se os perfis mais leves dos catálogos VS e VCS que representam soluções viáveis, mesmo que algum deles requeira contraflecha, conforme mostrado na Tabela 9.

A solução com o perfil VCS 550x63 proporciona uma economia de 43% de aço em comparação com o perfil VS 600x111.

Tabela 7 – Comparativo entre os perfis mais leves da série 600 dos catálogos VS e VCS.

Catálogo		VS	VCS	VCS / VS
Perfil		VS 600x111	VCS 600x85	-
Massa linear (kg/m)	Perfil original	111,0	85,2	0,77
	Viga celular	103,1	80,3	0,78
Flecha	Comb. rara	<i>L/378</i>	<i>L/326</i>	1,16
	Comb. Q.P.	<i>L/432</i>	<i>L/370</i>	1,17

Tabela 8 – Comparativo entre os perfis mais leves da série 550 dos catálogos VS e VCS.

Catálogo		VS	VCS	VCS / VS
Perfil		VS 550x88	VCS 550x63	-
Massa linear (kg/m)	Perfil original	88,4	63,2	0,71
	Viga celular	81,6	60,3	0,74
Flecha	Comb. rara	<i>L/234</i>	<i>L/223</i>	1,05
	Comb. Q.P.	<i>L/266</i>	<i>L/251</i>	1,06

Tabela 9 – Comparativo entre as soluções mais leves que atendem aos critérios no ELU e ELS-DEF dos catálogos VS e VCS.

Catálogo		VS	VCS	VCS / VS
Perfil		VS 600x111	VCS 550x63	-
Massa linear (kg/m)	Perfil original	111,0	63,2	0,57
	Viga celular	103,1	60,3	0,58
Flecha	Comb. rara	<i>L/378</i>	<i>L/223</i>	1,70
	Comb. Q.P.	<i>L/432</i>	<i>L/251</i>	1,72

6.5 Viga celular mista com perfil monossimétrico

Neste exemplo, o mesmo caso tratado no exemplo 6.3 é dimensionado, porém com perfil monossimétrico. Foi adotada como premissa a necessidade de uma mesa superior com pelo menos 250 mm de largura, para viabilizar o apoio de lajes alveolares. Partiu-se da solução com o perfil VCS 550x63 mostrada na Tabela 8.

O perfil VCS 550x63 possui mesas com largura de 200 mm, não atendendo à largura mínima requerida para a mesa superior. O perfil mais leve da mesma série que atenderia

é o VCS 550x82. Caso fosse adotada uma solução duplamente simétrica com este perfil, haveria um aumento de 30% do peso da viga original em relação à solução com o VCS 550x63. Além disso, a mesa do banzo inferior é solicitada por tensões normais de tração, sendo possível escolher um perfil mais leve do que o VCS 550x63 devido à ausência de instabilidade por compressão.

O VCA+ possibilita combinar perfis diferentes para os banzos superior e inferior, inclusive com diferentes graus de aço e ou catálogos distintos. Para isso, desmarque a opção “seção transversal simétrica” na janela da seção transversal (1), conforme mostrado na Figura 110. Em seguida, use o selecionador de abas (2) para comutar entre os banzos superior e inferior.

Escolha o perfil VCS 550x82 para o banzo superior e o VCS 500x57 para o inferior. Certifique-se que o aço ASTM A572 grau 50 foi selecionado para ambos.

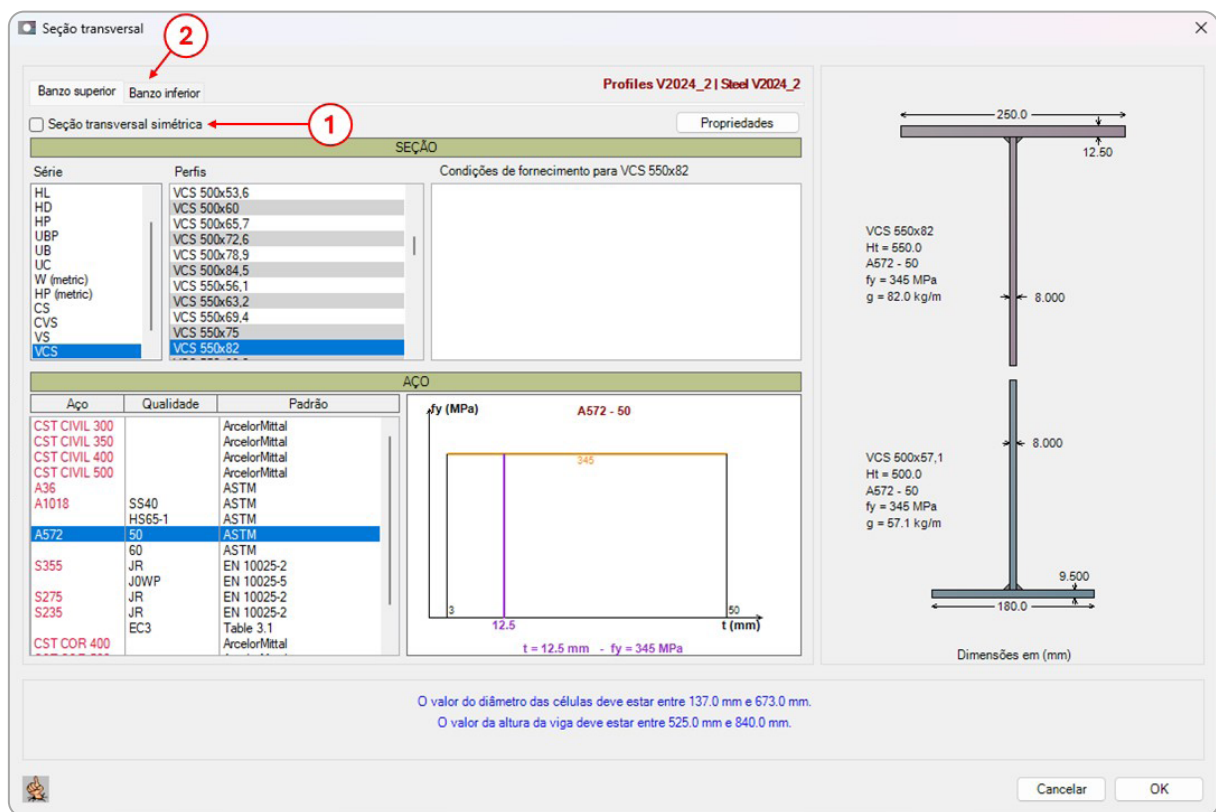


Figura 110 – Configuração da seção monossimétrica.

Na janela de corte das vigas, informe o diâmetro das células $\alpha_0 = 615$ mm e o espaçamento entre células $e = 750$ mm, conforme mostrado na Figura 111. Em seguida, clique em buscar as soluções e selecione a única solução encontrada, com altura total $H_t = 816,8$ mm.

Corte das vigas

Projeto da viga **Ajustes e dados**

Dimensões da viga

Comprimento da viga: 15 m

Parâmetros impostos

Pelo menos um parâmetro deve ser imposto

☒ Diâmetro das células $a_0 = 615$ mm

☒ Espaçamento das células

 Espaçamento $e = 750$ mm

 Largura do montante $w = 135$ mm


 Razão $e / a_0 = 1,22$

☒ Altura total: 816,78 mm

Buscar as soluções

n°	a_0 (mm)	w (mm)	e (mm)	e / a_0	n	Ht (mm)	m (kg)

Perfis base : Banzo superior VCS 550 x 82 / Banzo inferior VCS 500 x 57

☒ Exibir o corte da viga  ☐ Exibir o corte da viga

Cancelar OK

Figura 111 – Configuração de corte da viga celular mista monossimétrica.

A massa linear média dos perfis VCS originais é de 69,55 kg/m, representando um acréscimo no peso do perfil original de apenas 10% em relação à solução duplamente simétrica com o perfil VCS 550x63,2. Finalmente, pode-se observar no relatório preliminar de projeto que todas as taxas de carregamento no ELU foram atendidas.

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS - SEÇÃO MISTA			
<i>Verificações das seções líquidas nas aberturas</i>			
Resistência ao momento fletor (Abert. n° 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{M,max}$	= 0,923	✓
Resistência à força normal (Abert. n° 11 - Comb. U1) :	$\Gamma_{N,max}$	= 0,816	✓
Resistência à força cortante (Abert. n° 11 - Comb. U1) :	$\Gamma_{V,max}$	= 0,607	✓
Resistência à interação M+N (Abert. n° 15 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MN,max}$	= 0,974	✓
Resistência à interação N+V (Abert. n° 11 - Comb. U1) :	$\Gamma_{NV,max}$	= 0,816	✓
Resistência à interação M+V (Abert. n° 1 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MV,max}$	= 0,923	✓
Resistência à interação M+N+V (Abert. n° 15 - Comb. U1) :	$\Gamma_{MNV,max}$	= 0,977	✓
<i>Verificações da alma</i>			
Verificação de flambagem por cisalhamento (Montante n° 19 - Comb. U1) $\Gamma_{Vbw,max}$		= 0,228	✓
<i>Verificações dos montantes</i>			
Resistência ao cisalhamento (Montante n° 19 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Vh,max}$	= 0,671	✓
Resistência à flambagem (Montante n° 19 - Comb. U1) :	$\Gamma_{b,max}$	= 0,919	✓
espessura mínima da garganta (Montante n° 19 - Comb. U1) :	a_{min}	= 2,66 mm	
Aviso: a espessura da garganta é avaliada assumindo duas soldas			
A espessura total das soldas deve ser de pelo menos 5,32 mm			
Atenção: a espessura da garganta da solda de filete deve ser de pelo menos 3 mm			
<i>Verificações das seções brutas</i>			
Resistência à flexão (Montante n° 10 - Comb. U1) :	$\Gamma_{Mg,max}$	= 0,871	(*) ✓
(*) Este critério foi avaliado considerando uma seção transversal de aço classe 3, sem contribuição da laje			
(*) Um método menos conservador poderia melhorar este resultado			
Resistência ao cisalhamento (Extremidade esquerda - Comb. U1) $\Gamma_{Vg,max}$		= 0,149	✓

Figura 112 – Verificação dos ELU para a viga mista do Exemplo 6.5.

6.6 Viga celular de eixo curvo para cobertura de galpão

Neste exemplo, é dimensionada uma viga celular em arco para um galpão com as seguintes características:

Parâmetros gerais:

vão horizontal da viga:	15 m
raio de curvatura:	32 m
comprimento destravado:	2,16 m (distância entre terças)
apoios de extremidade:	viga simplesmente apoiada
perfil base:	VCS 400x32 (simétrico)
aço:	ASTM A572 Gr.50

Corte da viga:

número de células:	$n = 34$	
diâmetro das células:	$a_0 = 384,62 \text{ mm}$	$(a_0/d = 0,96)$
espaçamento das células:	$e = 434,62 \text{ mm}$	$(e/a_0 = 1,13)$
altura total do perfil celular:	$H_t = 502 \text{ mm}$	$(H_t/d = 1,26)$

Casos de carga:

Ações permanentes (G):

- carga permanente: peso próprio (calculado automaticamente)
- carga de superfície: $0,15 \text{ kN/m}^2$ (aplicada sobre a largura de influência)
 - telha de aço zincada, terças, tirantes e contraventamento

Sobrecargas:

- carga acidental (Q1): $0,25 \text{ kN/m}^2$
- vento (Q2): $0,30 \text{ kN/m}^2$ (vento de sucção)

Combinações últimas:

Estados-limites últimos:


- $U1 = 1,40 G + 1,50 Q1$
- $U2 = 1,00 G + 1,40 Q2$

Estados-limites de serviço:

- $S1 = 1,00 G + 1,00 Q1$
- $S4 = 1,00 G + 0,60 Q1$

Nos itens a seguir, é mostrado o passo a passo para a criação da viga no VCA+. Para mais detalhes sobre a interface gráfica das janelas, verificar o exemplo detalhado no item 6.1.

6.6.1 Criar uma 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**, configure as opções da seguinte maneira:

1. selecione a aba **Criar uma nova viga**;
2. escolha **Viga de aço** para calcular vigas não-mistas;
3. marque **Vigas celulares**;
4. selecione a opção **Viga curva**;
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.

6.6.2 Identificação do projetista

Na janela **Identificação**, o usuário pode identificar o projetista, a empresa, o projeto e a viga, além de poder acrescentar algum comentário relacionado à viga em causa e uma figura que identifique a empresa, que será apresentada no relatório de projeto (memorial de cálculo).

Os campos desta janela podem ser preenchidos parcialmente, ou simplesmente deixados em branco. As informações inseridas serão utilizadas no **Relatório de projeto preliminar**.

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

6.6.3 Vão e posição da viga

Na janela **Vão e posição da viga**, informe os seguintes parâmetros:

1. vão horizontal da viga: **15,0 m**;
2. curvatura da viga (raio): **32,0 m**;
3. tipo de viga: **Viga intermediária**;
4. espaçamentos L1 e L2: **5,0 m**.

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

6.6.4 Seção transversal

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

1. Não é necessário selecionar **Seção transversal simétrica**, porque vigas curvas têm que ter seção simétrica necessariamente.
2. Selecione a série **VCS**.
3. Selecione o perfil base **VCS 400x32**.
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** no canto inferior direito.

6.6.5 Corte da viga

A configuração do corte da viga celular é realizada na janela **Corte das vigas**. O VCA+ busca automaticamente as soluções de cortes possíveis para os parâmetros impostos pelo usuário, sempre respeitando o escopo das vigas celulares definido nas **Opções do software**. O usuário deve impor pelo menos um dos três parâmetros: diâmetro das células (α_0), espaçamento das células (e) ou altura total (H_t). Para encontrar a(s) solução(ões) de corte da viga, siga o seguinte procedimento:

1. selecione a aba **Projeto da viga**;
2. marque apenas a caixa de seleção **Altura total** e informe o maior valor possível de **502mm**;
3. clique no botão **Buscar as soluções**;
4. as possíveis soluções são listadas na tabela. Clique sobre uma solução para visualizar o desenho da viga na região inferior da janela. Escolha a primeira opção ($\alpha_0 = 384,62$ mm e $e = 434,62$ mm).

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

6.6.6 Contenção lateral da viga

A configuração de contenção lateral é feita na janela **Contenção lateral da viga**. Para isso, siga os passos listados a seguir.

1. Defina o tipo de contenção lateral. As opções são **Contenção lateral contínua** (por exemplo, vigas mistas), ou **Contenções laterais a serem definidas** (por exemplo, pontos de travamento horizontal de uma viga isolada de cobertura).
2. Selecione a opção **Contenções laterais a serem definidas** e clique no botão **Adicionar uma contenção lateral** para inserir o(s) ponto(s) de contenção desejado(s). A contenção inserida é identificada por um quadrado amarelo, posicionado no eixo horizontal médio da viga. Neste exemplo, um total de seis pontos de contenção lateral devem ser inseridos, resultando em comprimentos destravados de 2,16 m.

Após a inserção da contenção, clique no botão **OK** para prosseguir.

6.6.7 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.

6.6.7.1 Ações permanentes (G)

O VCA+ considera automaticamente o peso próprio da viga de aço. Portanto, faz-se necessário inserir apenas a carga permanente referente ao peso próprio das telhas, das terças, dos tirantes e do contraventamento, conforme a seguir:

1. selecione o caso de carregamento G – **Ações permanentes**;
2. o peso próprio da viga de aço é automaticamente considerado;
3. insira a carga distribuída de **0,75 kN/m** (5 m x 0,15 kN/m²).

6.6.7.2 Sobrecargas Q1 e Q2

Para inserir as sobrecargas Q1 e Q2, siga os seguintes passos:

1. selecione o caso de carregamento **Q1 – Sobrecarga 1**;
2. no painel **Cargas Distribuídas**, clique no botão **Adicionar**;
3. insira a carga uniformemente distribuída de **1,25 kN/m** sobre todo o comprimento da viga (5 m x 0,25 kN/m²);
4. repita os passos anteriores para a **Q2 – Sobrecarga 2** e insira o valor de **-1,50 kN/m** (5 m x -0,30 kN/m², vento de sucção).


6.6.8 Combinações de ações

As verificações no VCA+ são feitas para estados-limites últimos, estados-limites de serviço e estados-limites últimos 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 na janela **Combinações de ações**, conforme a seguir:

1. escolha a aba de acordo com o **estado-limite** desejado;
2. para ambos ELU e ELS, desative todas as regras padrão e ative as duas regras personalizadas;
3. configure os coeficientes das combinações personalizadas de acordo com o enunciado deste exemplo.

Em seguida, clique no botão **OK** para prosseguir.

6.6.9 Resultados – Relatório de Projeto Preliminar

Após a correta configuração de todos os parâmetros, clique no botão  na barra de ferramentas principal para gerar o **Relatório de Projeto Preliminar**. No menu **Opções**, marque o item **Relatório Detalhado**.

Em seguida, vá até à página do relatório onde os **resumos dos critérios dos estados-limites últimos (ELU)** são apresentados. Note que todos os critérios foram verificados com êxito (Figura 113).

Nos resumos dos critérios dos **estados-limites de serviço**, as flechas máximas para cada carregamento e cada combinação de serviço são apresentadas.

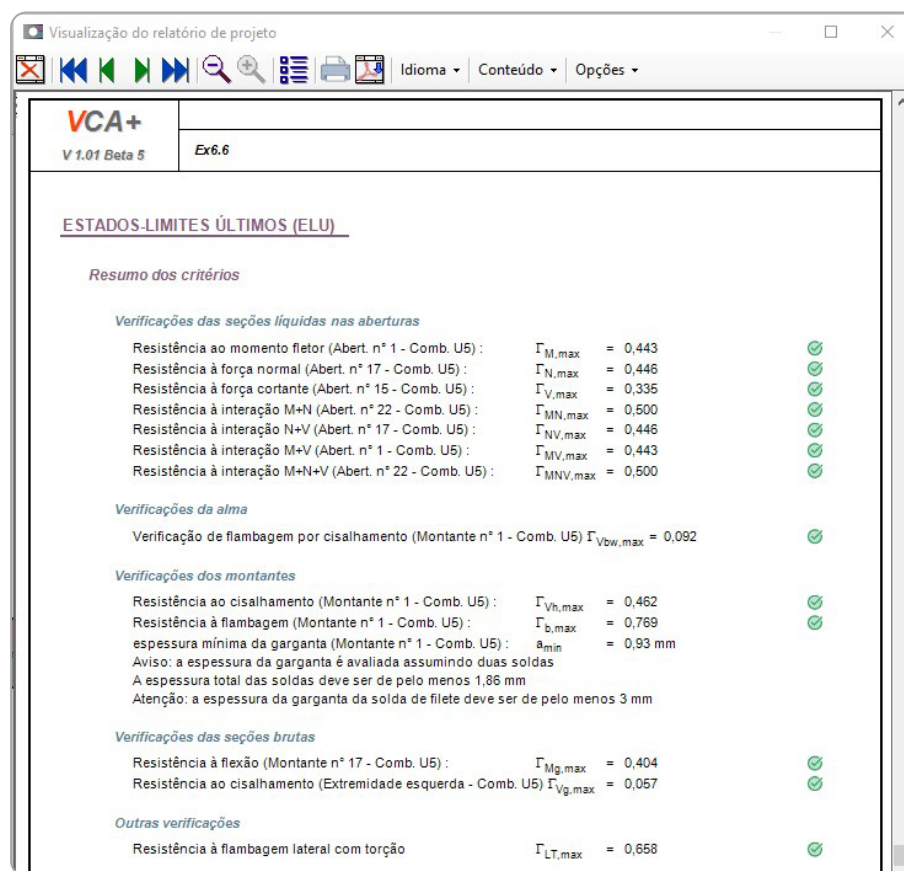


Figura 113 – Resultados para os ELU do exemplo 6.6 (viga curva).

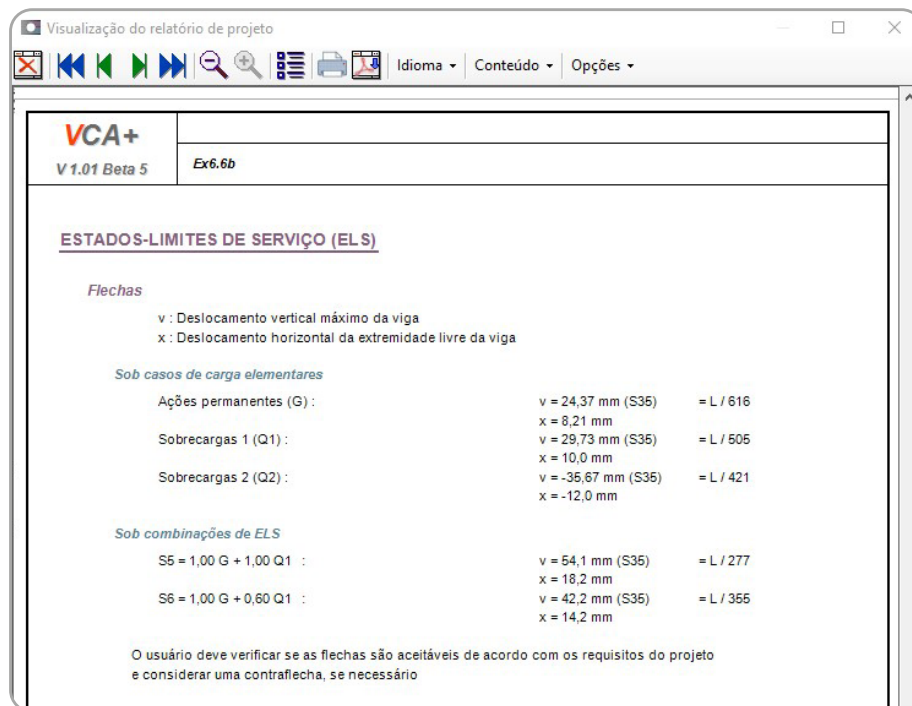


Figura 114 – Resultados para os ELS do exemplo 6.6 (viga curva).

Na Figura 115 é mostrado um desenho da viga curva deste exemplo gerado pelo VCA+.

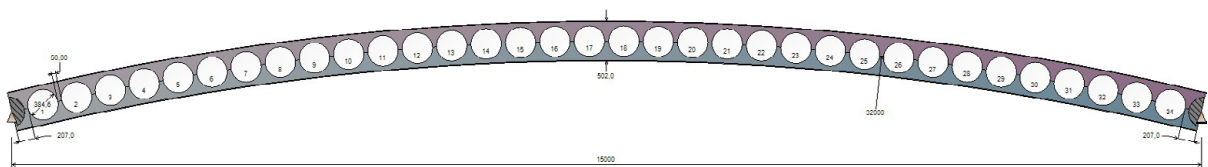


Figura 115 – Desenho da viga do exemplo 6.6.

ANEXO A – Comportamento estrutural de vigas celulares

Embora vigas celulares e vigas de alma cheia possam parecer similares, as vigas celulares apresentam distribuição de tensões e modos de falha diferentes devido às aberturas na alma. Por isso, as formulações de verificação de segurança dessas vigas diferem das aplicadas às vigas de alma cheia.

Nesta seção, são apresentados aspectos relevantes do comportamento estrutural de vigas celulares.

A.1 Distribuição de esforços e tensões

Em geral as vigas de aço de sistemas de piso de edifícios possuem ligações flexíveis em suas extremidades, normalmente por dois motivos:

1. facilitar fabricação e montagem (é o tipo de ligação mais simples de se fabricar e montar);
2. garantir que a viga fique sujeita apenas a momento positivo, o que representa uma vantagem no caso de sistemas de pisos mistos, pois permite contar com a contribuição da laje de concreto para resistir às tensões de compressão.

Geralmente admite-se que as vigas de aço de sistemas de piso de edifícios, comumente biapoiadas, estão sujeitas a um carregamento uniformemente distribuído, e as distribuições de momento fletor (M) e força cortante (V) são aquelas representadas na Figura 116.

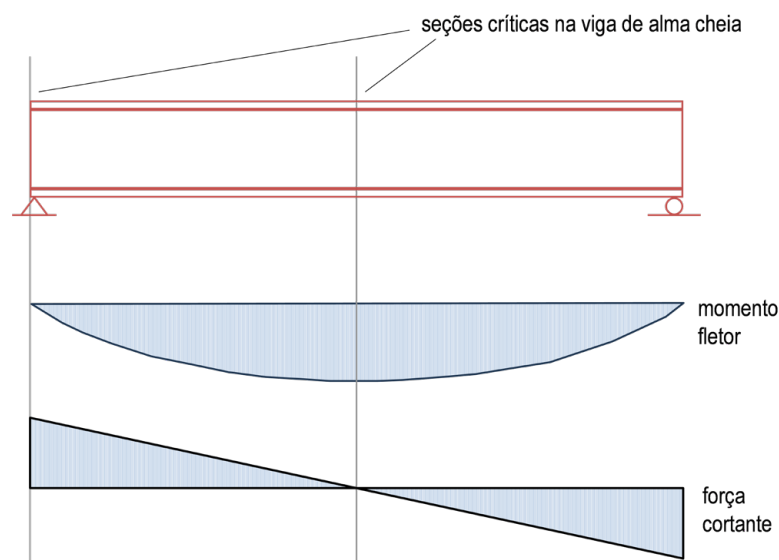


Figura 116 – Distribuições de momento fletor e força cortante numa viga de alma cheia biapoiada.

Nessa situação, o momento fletor é nulo nos apoios, onde a força cortante é máxima, e a força cortante é nula no centro do vão, onde o momento fletor é máximo. Devido à geometria dos perfis I, as mesas resistem principalmente às tensões normais da flexão, enquanto a alma resiste, em sua maior parte, às tensões de cisalhamento. Pode-se demonstrar que, entre o centro do vão e os apoios, a combinação de momento e força cortante nunca é mais crítica do que as condições isoladas de momento máximo no centro do vão e de força cortante máxima nos apoios. Assim, admite-se que não há interação M+V, permitindo a verificação independente de cada esforço.

Por outro lado, quando existem aberturas na alma de um perfil I, pelo menos 3 condições distintas se apresentam (Figura 117):

- retira-se uma parte da alma, o que tem duas consequências: reduz-se a área da seção resistente às tensões de cisalhamento e torna-se a alma menos estável (os pedaços de alma que sobram acima e abaixo das aberturas são elementos do tipo apoiado e livre - AL e não mais apoiado-apoiado - AA como no caso da alma cheia);
- a presença das aberturas exige que as tensões se distribuam de forma distinta da que ocorre em um perfil de alma cheia, ocasionando grandes concentrações de tensões normais e de cisalhamento no entorno das aberturas;
- devido às concentrações de tensões observadas no entorno das aberturas, a interação M+V não pode ser ignorada, exigindo uma verificação de tensões combinadas pelo critério de von Mises.

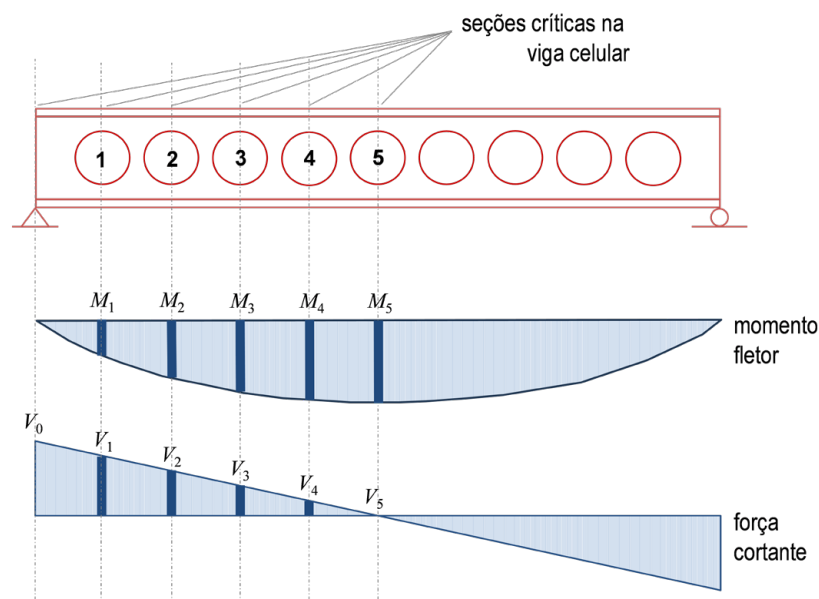


Figura 117 – Seções críticas numa viga biapoiada com abertura na alma.

Assim, no caso das vigas celulares, cada seção no centro de uma célula e cada montante entre duas aberturas devem ser verificados para o par M+V atuante naquela posição. Se o carregamento é simétrico e a viga é biapoiada, basta verificar as células e montantes em uma metade da viga, porque os demais serão simétricos.

A.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:

- Plastificação total da seção por tensões normais;
- Flambagem local da mesa (FLM);
- Flambagem local da alma (FLA);
- Flambagem lateral com torção (FLT);
- Plastificação total da alma por cisalhamento;
- Instabilidade da alma por cisalhamento.

As vigas celulares podem apresentar os seguintes modos de falha:

- Falha por momento fletor na abertura crítica;
- Falha por força normal na abertura crítica;
- Falha por força cortante na abertura crítica;
- Falha devido à interação $M+N$ na abertura crítica;
- Falha devido à interação $N+V$ na abertura crítica;
- Falha devido à interação $M+V$ na abertura crítica;
- Falha devido à interação $M+N+V$ na abertura crítica;
- Falha devido à flambagem da alma por cisalhamento no montante crítico;
- Falha por cisalhamento no montante crítico;
- Falha devido à flambagem do montante crítico;
- Falha devido à flexão do montante crítico;
- Falha por cisalhamento no montante extremo;
- Falha por flambagem lateral com torção.

A.2.1 Formação de mecanismo plástico

Nas vigas celulares pode ocorrer a formação de dois tipos de mecanismo plástico: (a) por formação de duas rótulas plásticas, uma na menor seção do tê superior e outra na menor seção no tê inferior, devido ao efeito do momento fletor somente; (b) por formação de 4 rótulas plásticas numa posição inclinada em relação ao eixo central da célula, devido ao efeito combinado de momento fletor e força cortante.

O primeiro ocorre geralmente quando há um número ímpar de células na viga, e a seção do centro do vão, onde atua o momento máximo, coincide com o centro de uma célula; ou no caso de vigas que recebem forças concentradas simétricas, decorrentes de reações de apoio de vigas secundárias que se apoiam nela. Neste caso, a região da viga entre as forças fica solicitada praticamente a flexão pura (Figura 118).

A imagem da Figura 118 foi obtida da simulação de uma viga celular com um modelo de elementos finitos, submetida a duas forças concentradas nas posições indicadas pelas setas. Nas regiões coloridas de vermelho, as tensões atingiram o limite de escoamento do aço. Consequentemente, formaram-se diversas rótulas plásticas nos tês superiores e inferiores nas células situadas na região entre as forças aplicadas.

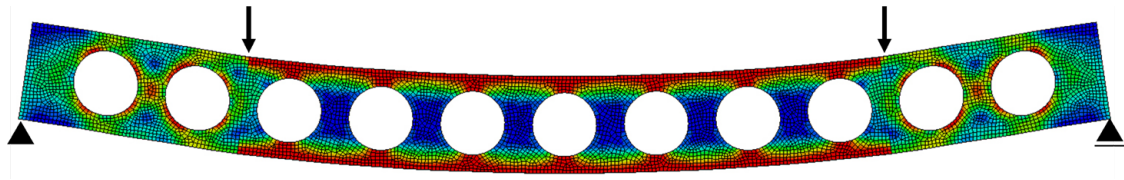


Figura 118 – Aspecto da deformada de uma viga celular que falha por mecanismo plástico devido unicamente ao momento fletor.
(fonte: Grilo, 2018)

O segundo tipo de mecanismo plástico, também referido como *Mecanismo Vierendeel*, geralmente ocorre quando há um número par de células na viga e a seção do centro do vão coincide com um montante de alma; ou quando há forças concentradas assimétricas em relação ao centro do vão. Neste caso, a atuação conjunta de tensões de cisalhamento, provocadas pela força cortante e de tensões normais decorrentes do momento fletor, causa uma distorção do trecho entre dois montantes de alma, como mostrado na Figura 119, semelhante ao mecanismo que se observa nas vigas Vierendeel (daí o nome *Mecanismo Vierendeel*).

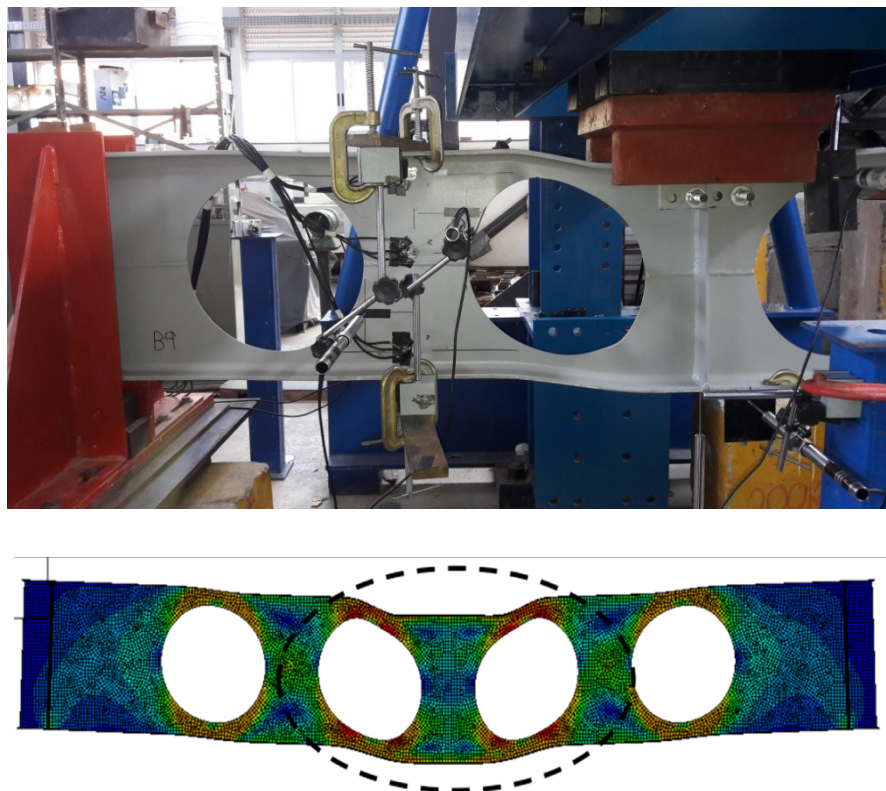


Figura 119 – Aspecto da deformada de uma viga celular que falha por mecanismo Vierendeel, devido à ação conjunta de momento fletor e força cortante.
(fonte: Grilo, 2018)

A.2.2 Flambagem lateral com torção (FLT)

A flambagem lateral com torção ocorre nas vigas celulares de modo muito similar ao que se observa com os perfis de alma cheia. Entretanto, as aberturas na alma afetam o comportamento das vigas celulares, em relação aos perfis de alma cheia, de modo que existem modelos de cálculo próprios para a verificação de FLT em vigas celulares (2019, Faria).

A.2.3 Flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV)

O efeito da força cortante tende a provocar uma distorção do painel que contém um montante de alma entre centros de duas células adjacentes. Assim, considerando um painel retangular circunscrevendo o montante, uma das diagonais do painel fica comprimida, e a outra, tracionada. A diagonal tracionada estabiliza o ponto central da diagonal comprimida, que, então, pode flambar em duas ondas, resultando na deformada mostrada na Figura 120.

Um dos melhores modelos para a verificação da FMAV em vigas celulares é o proposto por Grilo (2018) – ver também A.2.6.



Figura 120 – Aspecto do modo de falha por flambagem do montante de alma por cisalhamento.
(fonte: Grilo, 2018)

A.2.4 Flambagem do montante de alma por compressão (FMAC)

A flambagem do montante de alma por compressão pode ocorrer em determinados casos em que a alma é comprimida pelas mesas, devido ao momento fletor. Na flambagem por compressão, o montante de alma sofre um deslocamento para fora do plano da viga, sem que ocorra torção dos montantes de alma. Esse modo de falha ocorre normalmente em vigas sujeitas a um carregamento concentrado, sem a presença de enrijecedores, mas pode ser observado também em vigas com carregamento uniformemente distribuído (Valente, 2018, Teixeira, 2017).

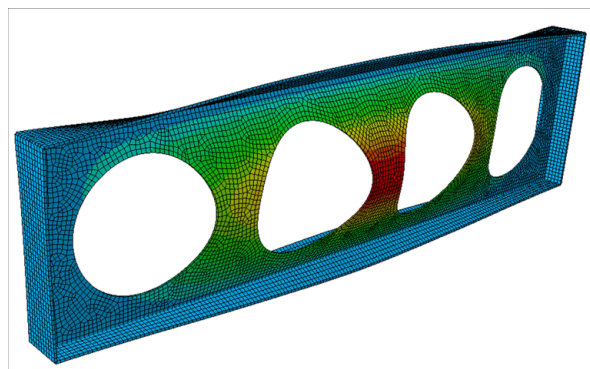


Figura 121 – Aspecto do modo de falha por flambagem do montante de alma por compressão.

A.2.5 Escoamento do montante de alma por tensões combinadas (EMAMV)

Grilo (2018) demonstra que o montante de alma, nas vigas celulares, quando robusto o suficiente para atingir plastificação total, escoá por um efeito combinado de tensões normais e de cisalhamento.

Dependendo da sua esbelteza, o montante pode sofrer instabilidade ou plastificação por cisalhamento, devido ao efeito da força cortante V_v , indicada na Figura 122-a. A força de cisalhamento horizontal V_h e o momento indicados na Figura 122 são consequência secundária da ação da força cortante V_v .

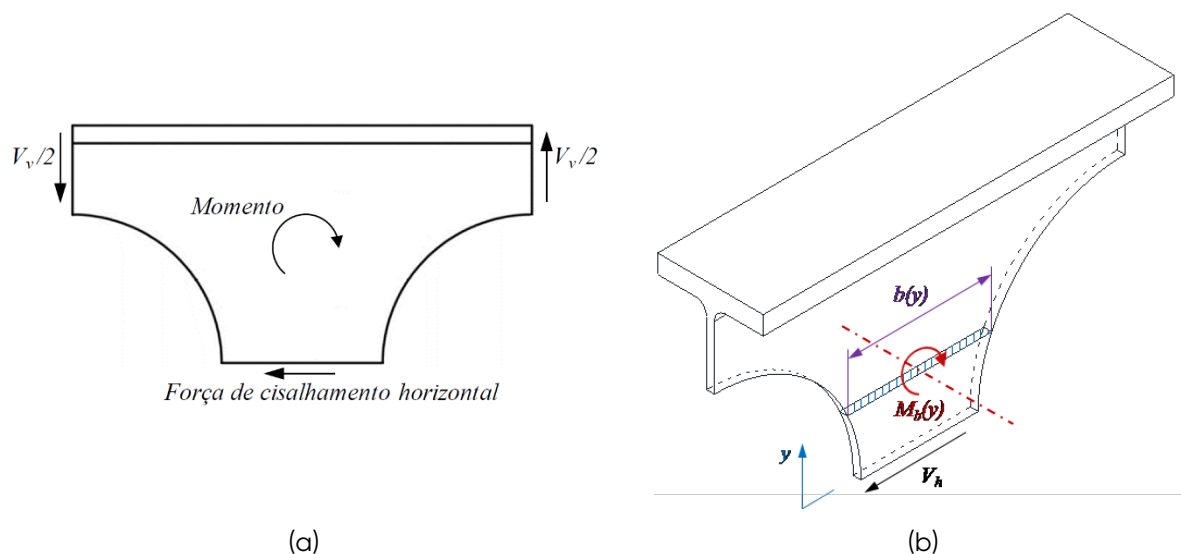


Figura 122 – (a) momento causado pela força de cisalhamento horizontal na emenda do montante de alma; (b) esforços atuantes no montante de alma.
(fonte: Grilo, 2018)

Como se pode observar na Figura 122-b, a metade do montante acima da junta soldada fica sujeita a uma força cortante constante e a um momento fletor que cresce com a distância y do eixo da viga. Porém, a seção resistente do montante varia (área hachurada na Figura 122-b), de modo que se tem um efeito combinado de tensões normais e de cisalhamento, que, em função da variação da seção do montante ao longo da altura, atingem um valor crítico em algum ponto intermediário da linha vertical entre o centro do montante e a cota do topo das aberturas.

Na Figura 123 são mostradas as variações da tensão normal, decorrente do momento $M = V_h \cdot y$, da tensão de cisalhamento, provocada pela força cortante V_y , e da tensão de von Mises no montante de alma de uma viga celular, entre o centro do montante e a cota do topo das aberturas. Observa-se que a máxima tensão de von Mises não se dá nem no ponto de tensão normal máxima nem no ponto de tensão de cisalhamento máxima (na região da emenda).

Na Figura 124 é mostrada a distribuição de tensões de von Mises no montante de alma de uma viga celular, decorrente do efeito combinado de tensões normais e de cisalhamento no montante de alma. É possível perceber a formação de duas rótulas plásticas, uma acima e outra abaixo da emenda do montante, evidenciando que as tensões máximas de von Mises, neste caso, não acontecem na região da emenda.

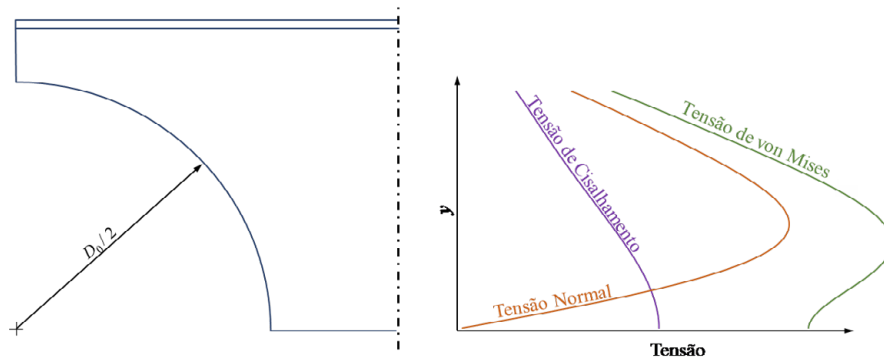


Figura 123 – Variação das tensões ao longo da altura y do montante de alma.
(fonte: Grilo, 2018)

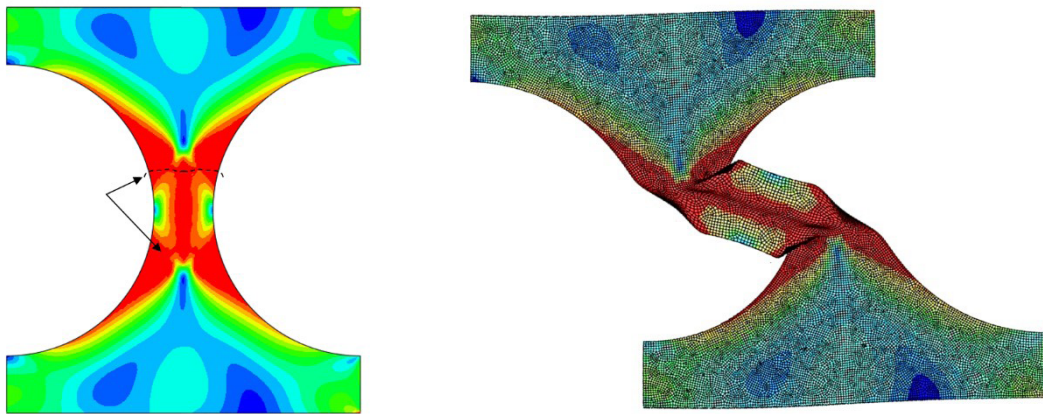


Figura 124 – Plastificação do montante de alma (tensões de von Mises).
(fonte: Grilo, 2018)

É possível deduzir um modelo de predição da força cortante última que causa a falha do montante de alma, que contempla tanto a falha por plastificação como por instabilidade. Esse modelo pode ser constituído por uma expressão única, como a proposta por Justino (2018), ou por duas ou três expressões que representam as faixas em que pode ocorrer plastificação, flambagem inelástica ou flambagem elástica. Grilo (2018) propôs uma curva de resistência para o modo de falha por FMAV em vigas celulares, composto por duas expressões complementares, que engloba o modo de falha por EMAMV (*escoamento do montante de alma por tensões combinadas*), similar à curva de compressão para barras de aço comprimidas.

A.2.6 Sobre a verificação dos modos de falha

O comportamento estrutural de perfis alveolares ainda é objeto de estudo, com diversos modelos propostos para verificar sua resistência. Porém, devido à seção variável e à diversidade geométrica, esses modelos costumam ser complexos e inviáveis para cálculo manual, sendo mais indicados para uso em software.

O Software VCA+ da ArcelorMittal, permite verificar de forma simples e rápida os Estados-Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS) de vigas celulares de aço, mistas ou não, incluindo tipologias especiais como vigas curvas e de altura variável.

A.3 Vigas celulares mistas

O mecanismo resistente à flexão em vigas baseia-se no equilíbrio entre duas forças opostas que atuam na seção transversal: uma força de compressão, aplicada no centroide do banzo comprimido, e uma força de tração, aplicada no centroide do banzo tracionado.

Nas vigas mistas, a mesa superior de concreto – formada por uma faixa da laje ligada ao perfil de aço – contribui para resistir à compressão, enquanto o perfil metálico resiste principalmente à tração. Assim, a situação ideal ocorre quando a linha neutra plástica (LNP) se posiciona exatamente na interface entre a laje e o perfil. No entanto, isso nem sempre acontece: a LNP pode situar-se dentro da laje ou dentro do perfil de aço (Figura 126).

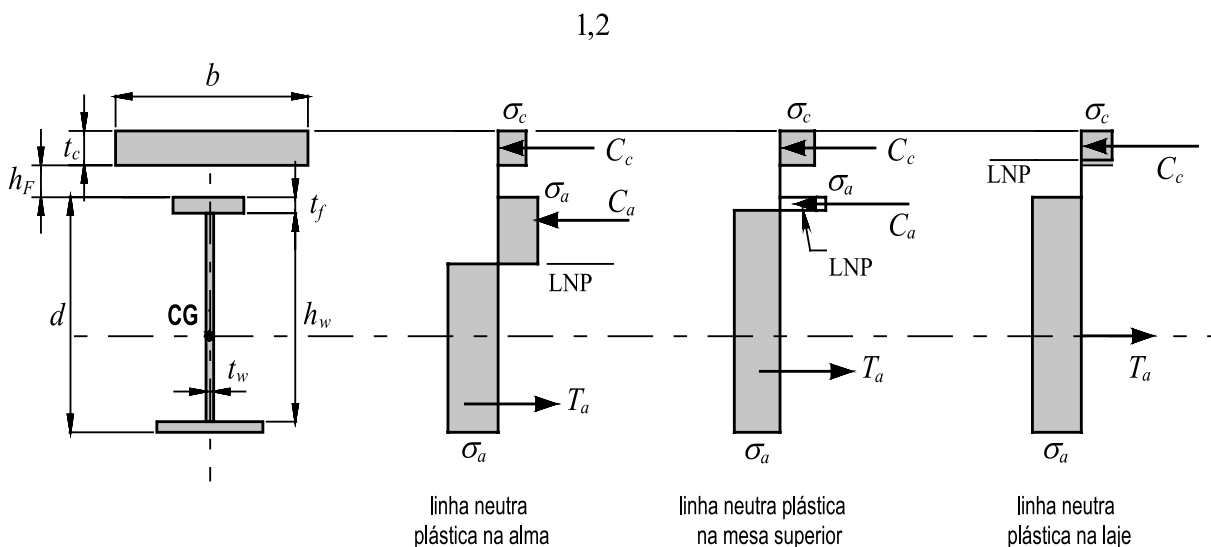


Figura 125 – Distribuição de tensões e resultantes de forças em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo.

Na Figura 126:

σ_o = 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.

Na mesma viga mista, a posição da LNP na altura da seção varia dependendo da região da viga. Quando a LNP está na laje, parte do concreto fica tracionado; quando está no perfil de aço, a mesa superior e, às vezes, parte da alma ficam comprimidas.

Em uma viga mista com laje relativamente esbelta, conforme mostra a Figura 127, a tensão de compressão na laje (f_c) é máxima sobre a viga de aço e diminui de forma não linear à medida que aumenta a distância transversal ao eixo da viga.

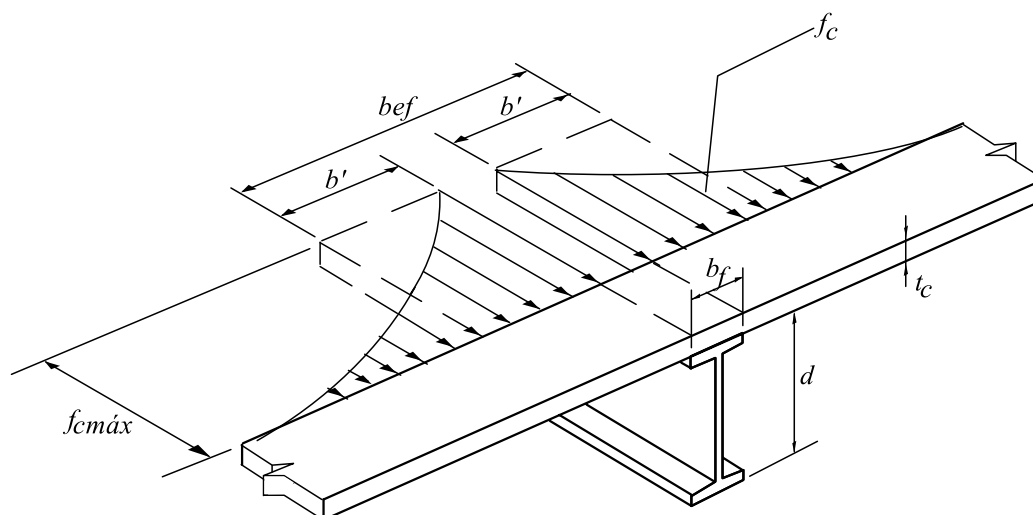


Figura 126 – Distribuição da tensão f_c e largura efetiva b_{ef} .

A análise teórica da largura efetiva envolve a teoria da elasticidade, de onde se conclui que o valor de b' (ver Figura 127) 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.

Em cada extremidade da viga, para efeito de projeto, considera-se que a largura efetiva da laje varia de zero, na extremidade longitudinal, até sua largura efetiva calculada, com uma inclinação de 2/3, conforme mostrado no esquema da Figura 128, que representa a vista em planta da laje de uma viga mista vista por cima.

Com a redução da largura efetiva da laje nas extremidades da viga, a resultante de compressão na laje diminui e a linha neutra desce para dentro do perfil de aço. Assim, parte do banzo superior passa a trabalhar à compressão junto com a laje, equilibrando a tração no banzo inferior. Nessa condição, a mesa superior e a parte superior da alma ficam comprimidas e, se muito esbeltas, podem sofrer flambagem local antes de atingir a tensão de escoamento do aço.

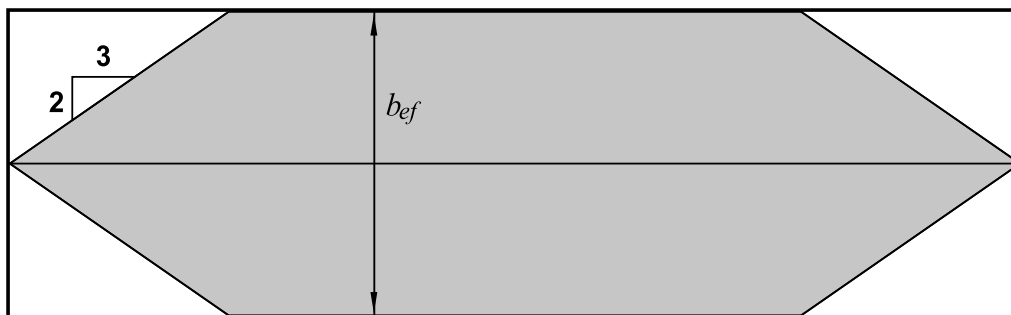


Figura 127 – Variação da largura efetiva da laje ao longo de uma viga mista.

No caso de vigas de alma cheia, as tensões nessas regiões extremas não chegam a atingir valores que governam o dimensionamento. Mas em uma viga celular isso pode ocorrer, devido à presença das aberturas. Por essa razão, é importante limitar a esbeltez das mesas e da alma em perfis que serão base para a fabricação de vigas celulares. Os perfis ideais para a confecção de vigas celulares devem possuir razão $d/bf \cong 3$, onde d é a altura total da seção do perfil base e bf é a largura da mesa comprimida. Além disso, deve-se cuidar para que a esbeltez da mesa comprimida atenda à seguinte condição:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 14 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (38)$$

onde:

b_f é a largura da mesa;

t_f é a espessura da mesa.

A.4 Seções críticas em vigas celulares

As seções críticas nas vigas celulares podem não se configurar de maneira análoga ao que ocorre nas vigas de alma cheia. As aberturas alteram o fluxo de tensões na alma, de modo que podem ocorrer pontos de concentração de tensões devidas a esforços combinados.

Em vigas isoladas de alma cheia, o dimensionamento comumente é governado pelas tensões normais de compressão que surgem na mesa e na alma, podendo provocar ELU associados a FLM, FLA ou FLT, e pelas tensões de cisalhamento na alma. Como a seção da viga é constante e contínua, a capacidade resistente independe da posição ao longo de seu comprimento, fazendo com que a seção crítica coincida com a seção de maior momento fletor ou maior 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 129.a).

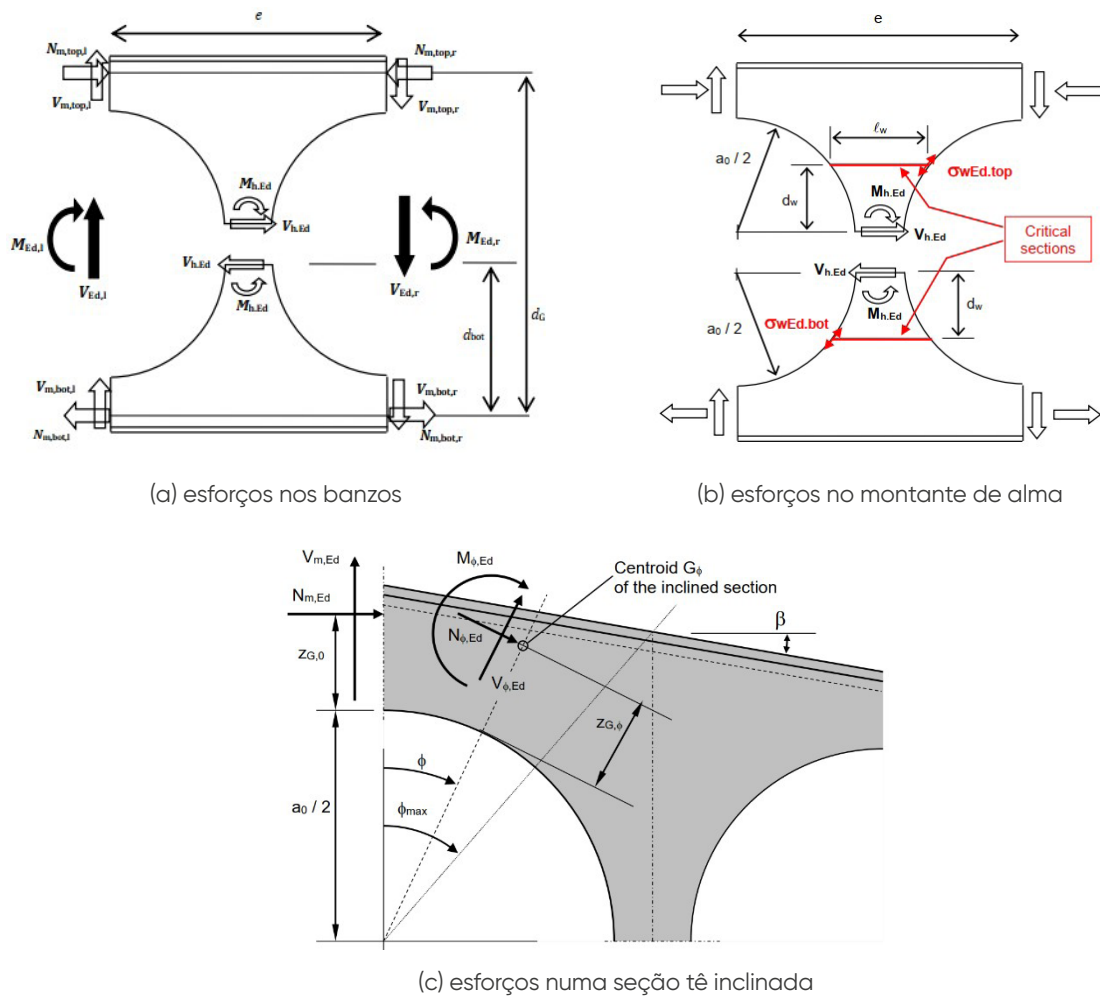


Figura 128 – Esforços internos em uma viga celular.

No montante de alma, o deslizamento relativo entre a parte superior e inferior da viga celular é impedido por uma resistência ao cisalhamento horizontal ($V_h E_d$) na emenda entre as duas metades do perfil celular (Figura 129.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 129.b).

A força normal e a força cortante nas seções dos três são excêntricas em relação às seções tê inclinadas que acompanham a abertura circular na região dos banzos, provocando esforços internos de momento fletor (M_ϕ), força cortante (V_ϕ) e esforço normal (N_ϕ), todos função do ângulo de inclinação ϕ medido a partir do eixo vertical das aberturas (Figura 129.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.(39).

$$M_{\phi} = N_m e_N + V_m e_V \quad (39)$$

$$\text{onde: } e_N = \frac{a_0}{2} + z_{G,0} - \left(\frac{a_0}{2} + z_{G,0} \right) \cos(\phi) \quad \text{braço de alavanca de } N_m \quad (40)$$

$$e_V = \left(\frac{a_0}{2} + z_{G,0} \right) \sin(\phi) \quad \text{braço de alavanca de } V_m \quad (41)$$

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 130.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 130.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.

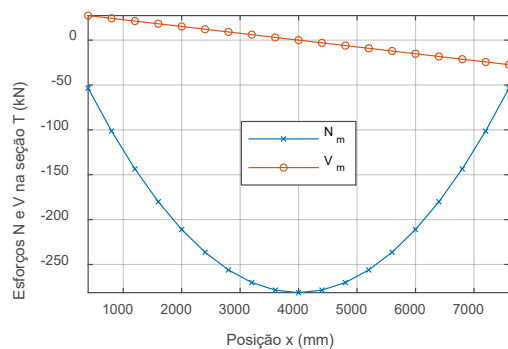
Na Figura 130.c e na Figura 130.d são mostradas as componentes $M_{\phi,N}$ e $M_{\phi,V}$ e o momento solicitante total $M_{\phi,Sd}$ nas seções inclinadas na primeira abertura próxima ao apoio e na abertura no centro do vão, respectivamente, para uma determinada viga celular. Verifica-se que o momento $M_{\phi,Sd}$ 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.

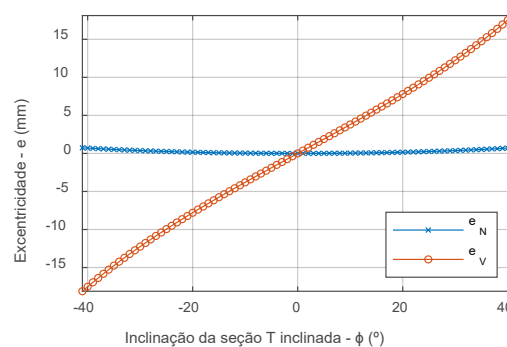
O dimensionamento à flexão de uma viga celular em perfil I soldado envolve: (1) a verificação da flexão em perfis T monossimétricos, com a mesa superior comprimida; e (2) a verificação da estabilidade do montante de alma. A capacidade resistente depende das propriedades geométricas do perfil original,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

Perfis I soldados adequados para vigas celulares devem possuir relação $d/b_f \cong 3$ (d é a altura total do perfil e b_f é a largura da mesa).

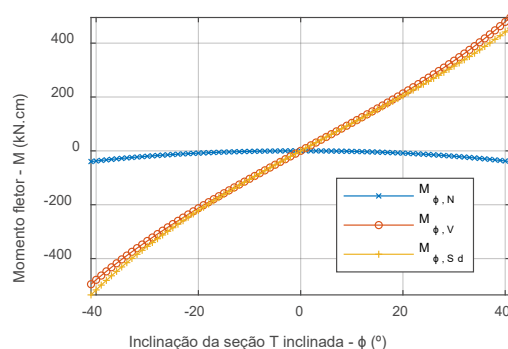
A redução da altura do perfil pode aumentar o esforço normal da seção tê, para compensar a redução do braço de alavanca entre os centroides dos banzos, podendo provocar a falha por flexão nas seções tê inclinadas devido ao aumento do momento fletor secundário resultante.



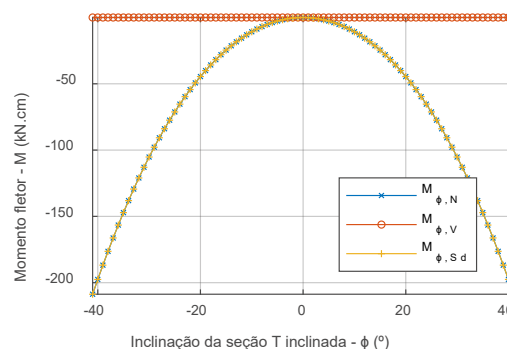
(a) Esforços internos na seção tê.



(b) Excentricidades nas seções tê inclinadas.



(c) Esforços nas seções inclinadas na primeira abertura.



(d) Esforços nas seções inclinadas na abertura central.

Figura 129 – Excentricidades e esforços internos nas seções T inclinadas no banzo superior de uma viga celular.

A relação a_o/d pode influenciar de forma contraintuitiva a capacidade da viga celular (a_o é o diâmetro das aberturas). 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_o/d podem gerar seções líquidas (seções tê) muito baixas para resistir aos momentos fletores, exigindo a redução do diâmetro das aberturas;
- valores muito baixos de a_o/d podem originar seções líquidas nas aberturas (seções tê) 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_o . Aumentar o passo (e) aumenta a largura do montante de alma, elevando a área de cisalhamento horizontal e reduzindo a esbeltez do montante. Isso resulta em maior resistência ao cisalhamento horizontal e à flambagem do montante.

É importante observar a relação h/tw dos perfis soldados, para evitar almas muito esbeltas, que podem comprometer a capacidade resistente da viga celular.

Referências

1. 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/UFG. Belo Horizonte, 2019.
2. 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/UFG. Belo Horizonte, 2018.
3. 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.
4. Kerdal, D.; Nethercot, D. A. *Failure modes for castellated beams*. Journal of Constructional Steel Research, v. 4, p. 295-315, 1984.
5. 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.
6. 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/UFG. Belo Horizonte, 2018.
7. 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.
8. Teixeira, F.B. *Análise numérica de perfis alveolares de aço*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFG. Belo Horizonte, 2017.

MANUAL DE VIGAS CELULARES

ArcelorMittal

Produzido pela ArcelorMittal Brasil em cooperação com pesquisadores do:

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
2025**