

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PÓRTICOS DE AÇO EM PERFIS CELULARES: ANÁLISE COMPARATIVA COM
PERFIS SOLDADOS DE ALMA CHEIA

ARTHUR CAMPOS FERREIRA

JUIZ DE FORA

2026

PÓRTICOS DE AÇO EM PERFIS CELULARES: ANÁLISE COMPARATIVA COM
PERFIS SOLDADOS DE ALMA CHEIA

ARTHUR CAMPOS FERREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Orientador: Prof. Wanderson Fernando Maia

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2026

PÓRTICOS DE AÇO EM PERFIS CELULARES: ANÁLISE COMPARATIVA COM
PERFIS SOLDADOS DE ALMA CHEIA

ARTHUR CAMPOS FERREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 20/07/2026

Por:

Prof. Wanderson Fernando Maia, D. Sc. (Orientador)

Departamento de Estruturas/Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Cleber Maestri Gonçalves, M. Sc. (Examinador 01)

Departamento de Estruturas/Universidade Federal de Juiz de Fora

Engenheira Nicolý Sabadin Manera (Examinadora 02)

Inusa Construções Metálicas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por sua presença constante em minha vida e por ter sido meu amparo em todos os momentos desta caminhada. Durante os anos de graduação, especialmente nos desafios enfrentados pela distância de casa, encontrei na fé a força necessária para seguir em frente. A Ele agradeço pelo dom do discernimento, pela resiliência diante das dificuldades e pela sabedoria concedida durante o desenvolvimento deste trabalho, conduzindo cada etapa desta conquista.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor, apoio e incentivo ao longo desta jornada. Mesmo separados pela distância física, nunca deixei de sentir a presença e o carinho de vocês em cada conquista e em cada momento de dificuldade. Todo o esforço, a saudade e os desafios vividos longe de casa certamente terão valido a pena, pois esta conquista também pertence a vocês, que sempre acreditaram em mim e tornaram possível a realização deste sonho.

À minha namorada, Vitória, agradeço por caminhar ao meu lado durante toda a trajetória. Obrigado por compartilhar comigo os momentos de alegria, por oferecer apoio nos períodos mais difíceis e por sempre me acolher com carinho, paciência e palavras de incentivo. Seus conselhos, sua compreensão e sua presença foram fundamentais para que eu mantivesse a confiança e a motivação para superar os desafios da graduação e concluir este trabalho.

Aos amigos que fiz durante a graduação, deixo meu sincero agradecimento por terem tornado essa jornada mais leve e especial. Com vocês, compartilhei não apenas os desafios encontrados ao longo da faculdade, mas também muitos momentos de estudo, descontração, companheirismo e apoio mútuo. Cada conversa, cada troca de conhecimento e cada instante de amizade contribuíram para tornar essa caminhada mais significativa, deixando lembranças que levarei comigo para além da vida acadêmica.

Por fim, agradeço aos professores que fizeram parte da minha formação, por compartilharem seus conhecimentos e experiências ao longo da graduação, contribuindo de maneira significativa para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal. Em especial, expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Wanderson, pela confiança depositada neste trabalho, pela disponibilidade e pelas orientações sempre pertinentes para o desenvolvimento desta pesquisa. Seus ensinamentos e sua dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho e para minha formação como engenheiro civil.

"A melhor estrutura não é a que resiste a maiores cargas, mas a que cumpre sua função com o menor esforço e a maior elegância."

(Eduardo Torroja)

RESUMO

Diante da crescente busca por soluções estruturais mais eficientes para edificações em aço, os perfis celulares destacam-se por proporcionar maior aproveitamento estrutural, redução do consumo de material e benefícios arquitetônicos, como leveza visual, possibilidade de integração com as instalações prediais e melhor aproveitamento da iluminação natural. Nesse contexto, este trabalho realizou uma análise comparativa entre pórticos em aço dimensionados com perfis I soldados de alma cheia e perfis celulares. Para tanto, foram analisados seis modelos de pórticos, contemplando diferentes combinações de vãos e alturas de pilares. O dimensionamento dos pórticos em perfis de alma cheia foi realizado no programa SAP2000, considerando as verificações de Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU) conforme os critérios da ABNT NBR 8800:2024. Para os perfis celulares, empregou-se o programa VCA+, desenvolvido pela ArcelorMittal Brasil, complementado por adaptações metodológicas para representar o comportamento estrutural dos sistemas, uma vez que ainda não existem normas técnicas específicas para o dimensionamento de perfis com aberturas na alma. Os resultados demonstraram que os pórticos em perfis celulares apresentaram redução média de **17,6%** no consumo de aço em relação às soluções convencionais, além de redução média de **54,9%** nos deslocamentos em serviço, decorrente do aumento da inércia das seções após a expansão. Esses resultados evidenciam que os perfis celulares constituem uma alternativa estrutural eficiente para pórticos em aço, especialmente em edificações de grandes vãos, conciliando desempenho estrutural, economia de material e vantagens construtivas e arquitetônicas.

Palavras-chave: Perfis celulares; Pórticos em aço; Dimensionamento estrutural; Consumo de aço.

ABSTRACT

Given the growing demand for more efficient structural solutions for steel buildings, cellular beams have emerged as an attractive alternative due to their improved structural performance, reduced steel consumption, and architectural advantages, such as enhanced visual lightness, integration of building services within the structural system, and improved use of natural lighting. In this context, this study presents a comparative analysis between steel portal frames designed using welded I-shaped solid-web sections and cellular sections. Six portal frame models were analyzed, considering different span lengths and column heights. The solid-web portal frames were designed using the SAP2000 software, with Serviceability Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS) verifications carried out in accordance with the requirements of ABNT NBR 8800:2024. The cellular sections were designed using the VCA+ software, developed by ArcelorMittal Brasil, complemented by methodological adaptations to accurately represent the structural behavior of portal frame systems, since no specific design standards are currently available for members with web openings. The results showed that the portal frames with cellular sections achieved an average reduction of **17.6%** in steel consumption compared with conventional solid-web solutions, as well as an average reduction of **54.9%** in service displacements due to the increased moment of inertia provided by the expansion process. These findings demonstrate that cellular sections constitute an efficient structural alternative for steel portal frames, particularly in long-span buildings, combining structural performance, material savings, and constructive and architectural advantages.

Keywords: Cellular sections; Steel portal frames; Structural design; Steel consumption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de fabricação do perfil castelado	13
Figura 2 - Processo de fabricação do perfil celular	14
Figura 3 - Fases progressivas de laminação dos perfis I	18
Figura 4 - Esquemas de laminação para chapas, perfis e barras.....	18
Figura 5 - Geometrias usuais dos perfis laminados estruturais	19
Figura 6 - Exemplos de perfis soldados	19
Figura 7 - Séries de perfis soldados.....	20
Figura 8: Cortes efetuados por Máquinas CNC.....	22
Figura 9: Aplicação de perfis celulares no Centro de Convenções do World Trade Center....	23
Figura 10: Aplicação de vigas curvas celulares no Liverpool FC Academy.....	23
Figura 11: Aplicação de vigas celulares de altura variável na cobertura do Hull KC Stadium	24
Figura 12: Vigas celulares aplicadas em estacionamentos.....	25
Figura 13: Passagem de dutos pelos alvéolos.....	26
Figura 14 - Simbologia da seção transversal dos perfis alveolares	27
Figura 15 - Simbologia da seção longitudinal de perfis castelados.....	27
Figura 16 - Simbologia da seção longitudinal de perfis celulares	28
Figura 17 - Seções críticas.....	29
Figura 18 - Formação de rótulas plásticas devido à ação de momento fletor	30
Figura 19 - Formação do Mecanismo de Vierendeel	31
Figura 20 - Flambagem Lateral com Torção	32
Figura 21 - Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento	33
Figura 22 - Flambagem do Montante de Alma por compressão	33
Figura 23 - Escoamento do Montante de Alma na junta soldada.....	34
Figura 24 - Modelo 1 (Pórtico 6-15)	36
Figura 25 - Modelo 2 (Pórtico 6-25)	37
Figura 26 - Modelo 3 (Pórtico 6-35)	37
Figura 27 - Modelo 4 (Pórtico 10-15)	38
Figura 28 - Modelo 5 (Pórtico 10-25)	38
Figura 29 - Modelo 6 (Pórtico 10-35)	39
Figura 30 - Inserção da geometria da estrutura no programa VisualVentos	43
Figura 31 - Definição da velocidade básica do vento.....	44
Figura 32 - Definição dos Fatores S_1 , S_2 e S_3 adotados para o cálculo	45

Figura 33 - Casos críticos de carregamento associado ao vento para o Modelo 1 - Pórtico 6-15	47
Figura 34 - Verificação estrutural do Modelo 1 (Pórtico 6-15).....	54
Figura 35 - Tipos de vigas celulares abrangidas pelo escopo do programa VCA+	56
Figura 36 - Parâmetros gerais da viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15)	60
Figura 37 - Tela de vão e posição da viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15).....	61
Figura 38 - Tela de definição da seção transversal para a viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15)...	62
Figura 39 - Tela de definição dos parâmetros de corte dos perfis.....	63
Figura 40 - Tela de informações da análise estrutural para vigas do Pórtico AC 6-15	64
Figura 41 - Diagrama de Momento Fletor (Pórtico 6-15)	66
Figura 42 - Diagrama de Esforço Normal (Pórtico 6-15).....	67
Figura 43 - Modelo Estrutural Adaptado para as vigas celulares.....	67
Figura 44 - Modelo Estrutural Adaptado para os pilares celulares	68
Figura 45 - Tela de definição dos casos de carregamento - Vigas	69
Figura 46 - Tela de definição dos casos de carregamento - Pilares.....	69
Figura 47 - Tela de combinações de ações - Vigas	71
Figura 48 - Tela de combinações de ações - Pilares.....	72
Figura 49 - Tela do relatório com a Análise do ELU - Viga do Modelo 2 (Pórtico 6-25).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Combinações para o Estado Limite de Serviço.....	48
Tabela 2 - Combinações para o Estado Limite Último	49
Tabela 3 - Perfis pré-dimensionados em alma cheia	50
Tabela 4 - Deslocamentos máximos estabelecidos por norma	51
Tabela 5 - Verificação das flechas verticais e horizontais.....	52
Tabela 6 - Perfis aprovados após a verificação do ELU.....	54
Tabela 7 - Perfis celulares pré-dimensionados para os 6 modelos	59
Tabela 8 - Relações parametrizadas para otimização do corte para perfis celulares.....	63
Tabela 9 - Resumo dos perfis celulares aprovados após análise do ELU	74
Tabela 10 - Comparação entre as inércias das soluções estruturais	75
Tabela 11 - Verificação do ELS dos pórticos em perfil celular	76
Tabela 12 - Comparação entre pesos lineares dos Perfis VS de Alma Cheia e Perfis Originais VCS	78
Tabela 13 - Comparação entre o peso linear e altura dos Perfis de Alma Cheia Finais e Perfis Celulares Expandidos	79
Tabela 14 - Resumo dos pesos totais de Pilares, Vigas e Pórticos completos	81
Tabela 15 - Diferenças Absoluta e Percentual entre o peso dos Pórticos.....	81
Tabela 16 - Comparação entre os deslocamentos obtidos pelos Pórticos	83
Tabela 17 - Validação das relações de Pré-Dimensionamento.....	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 PERFIS DE AÇO CONVENCIONAIS	17
2.1.1 Generalidades	17
2.1.2 Perfis Laminados	17
2.1.3 Perfis Soldados	19
2.1.4 Comportamento Estrutural	20
2.2 PERFIS COM ABERTURA NA ALMA	21
2.2.1 Generalidades	21
2.2.2 Aplicações	22
2.2.3 Nomenclatura e Simbologia	26
2.2.4 Efeito Estrutural das Aberturas na Alma	28
2.2.5 Modos de Falha	29
3 METODOLOGIA.....	35
3.1. MODELOS	36
3.2. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS.....	39
4 DIMENSIONAMENTO.....	41
4.1 CARREGAMENTO	41
4.1.1 Ações Permanentes	41
4.1.2 Ações Variáveis.....	42
4.1.3 Combinações de Ações	48
4.2 PÓRTICOS EM PERFIS DE ALMA CHEIA.....	49
4.2.1 Pré-Dimensionamento	49
4.2.2 Verificação do ELS	50
4.2.3 Dimensionamento do ELU	53
4.3 PÓRTICOS EM PERFIS CELULARES	55
4.3.1 Considerações Iniciais.....	55
4.3.2 Pré-Dimensionamento	57
4.3.3 Definições Geométricas	60

4.3.4 Dimensionamento do ELU	64
4.3.5 Verificação do ELS	74
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
5.1 COMPARAÇÃO EM PESO LINEAR.....	77
5.2 COMPARAÇÃO EM PESO TOTAL	80
5.3 COMPARAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS	82
5.4 VALIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO	84
6 CONCLUSÃO.....	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso do aço na construção civil tem se consolidado como uma solução estrutural eficiente e competitiva, acompanhando a crescente demanda por sistemas construtivos mais racionais e sustentáveis. Um dado divulgado pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), em conjunto com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), mostravam que em 2014 as construções metálicas já ocupavam por volta de 15% do mercado da construção civil no país. Embora não se tenha este mesmo dado atualizado para os dias atuais, outras estatísticas mostram que o uso do aço tem ganhado cada vez mais espaço no cenário. A Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM) trabalha em apoio ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), trazendo repertório estatístico para a discussão, e informou que, a partir do ano de 2019, a produção das estruturas de aço cresceu no ritmo de 18,3% ao ano, com pesquisas que mostram números crescentes em produção, capacidade produtiva dos fabricantes e faturamento anual.

As estruturas em aço destacam-se pela elevada resistência mecânica, pela rapidez de execução e pela possibilidade de redução de desperdícios, características que as tornam especialmente atrativas em empreendimentos que exigem otimização de prazo, controle de custos e maior sustentabilidade.

O avanço das tecnologias de projeto e fabricação, aliado à evolução das normas técnicas, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 8800:2024, tem contribuído para a ampliação do uso do aço em diferentes tipologias estruturais. Esse cenário favorece a adoção de soluções cada vez mais eficientes, permitindo que engenheiros explorem alternativas que conciliem desempenho estrutural, economia de material e viabilidade construtiva.

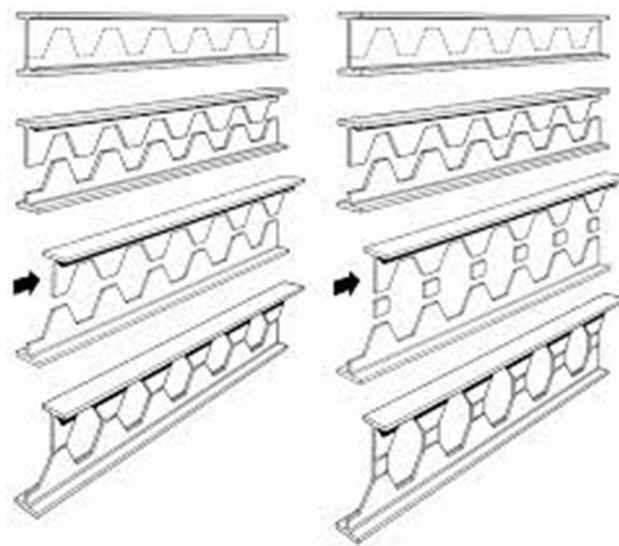
Neste contexto, ganham força os perfis alveolares, caracterizados por cortes longitudinais que produzem aberturas, de variadas geometrias, na alma. Estes perfis surgiram, inicialmente na configuração castelada, com aberturas de geometria hexagonal ou octogonal, na Europa por volta dos anos 1930, como alternativa para suprir o número limitado de seções estruturais que os fabricantes conseguiam desenvolver à época (Fares, Coulson e Dinehart, 2016). Posteriormente, com o surgimento de novas tecnologias de projeto e fabricação,

entraram em cena os perfis celulares, com alvéolos na geometria circular, como alternativa aos perfis castelados, obtidos por processos de corte mais complexos (Veríssimo *et al.*, 2025).

Por muito tempo, estes perfis foram amplamente explorados, especialmente na Europa e nos Estados Unidos. Porém, o aumento dos custos associados à sua produção resultou na redução de sua aplicação. O mencionado surgimento de máquinas mais modernas para cortes e soldas em aço, motivou a reativação do interesse pela produção e aplicação de perfis alveolares, levando ao surgimento de novas tipologias e geometrias (Sakiyama, 2018).

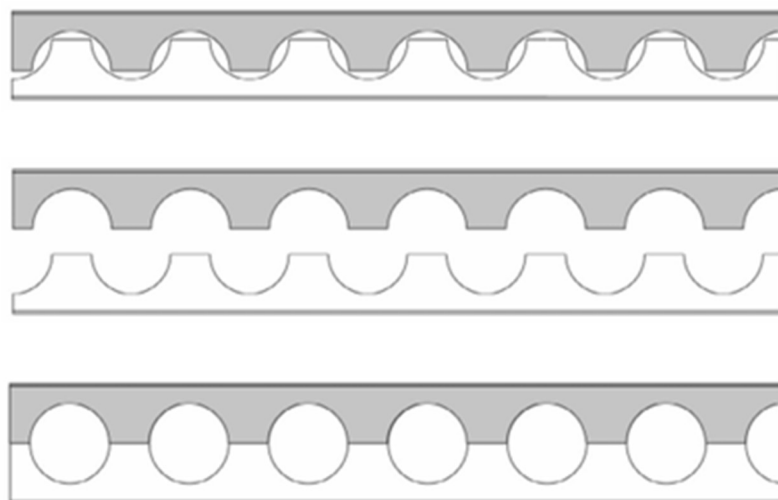
O processo de fabricação dos perfis alveolares se dá a partir do corte longitudinal de um perfil de alma cheia, seguido por um posterior deslocamento de certo comprimento e novo procedimento de solda, reunindo as duas partes. Este processo dá origem a uma peça de altura superior a original e com uma sequência de aberturas na alma. A Figura 1 mostra o processo de fabricação de um perfil castelado, enquanto a Figura 2 traz o processo para um perfil celular.

Figura 1 - Processo de fabricação do perfil castelado



Fonte: Grünbauer, 2012

Figura 2 - Processo de fabricação do perfil celular



Fonte: ArcelorMittal, 2025

O ganho de altura e a redistribuição de material para as regiões mais solicitadas mantendo o peso próprio, confere elevada eficiência estrutural aos perfis alveolares. Sob este aspecto, os perfis castelados e celulares possuem como principal vantagem o aumento de inércia em relação ao perfil de alma cheia original, conferindo melhor desempenho à flexão e a possibilidade de cobrir maiores vãos sem necessariamente elevar o consumo de aço.

Além disso, a presença de aberturas ao longo da alma permite soluções mais eficientes do ponto de vista construtivo e arquitetônico, pois facilita a passagem de instalações prediais, contribui para a melhoria da ventilação e iluminação natural nos ambientes e confere à estrutura uma aparência visual mais leve e harmoniosa, com um efeito estético que pode ser explorado pelos arquitetos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar das vantagens associadas aos perfis alveolares, os perfis de aço de alma cheia continuam sendo amplamente utilizados em projetos estruturais, sobretudo em razão da disponibilidade de normas com procedimentos de cálculo consolidados e da vasta oferta de softwares para seu dimensionamento e detalhamento. A limitação na oferta de ferramentas computacionais pode influenciar diretamente a escolha do sistema estrutural adotado em projeto, nem sempre refletindo a alternativa mais eficiente do ponto de vista técnico ou econômico.

Nesse sentido, o tópico central que motiva esta pesquisa consiste na necessidade de avaliar, de forma comparativa e fundamentada por procedimentos disponíveis na literatura, o desempenho estrutural e o custo associado ao uso de perfis alveolares, com destaque para os perfis celulares, em relação aos perfis de alma cheia, considerando condições equivalentes de carregamento e critérios de projeto. Embora existam softwares consolidados para o dimensionamento de perfis de alma cheia, observa-se uma menor disponibilidade de ferramentas para as diferentes tipologias de perfis com aberturas, o que reforça a importância de estudos que sistematizem resultados e contribuam para a compreensão do comportamento desses elementos estruturais.

Dessa forma, a realização de um estudo comparativo técnico e econômico justifica-se como uma contribuição acadêmica relevante, ao fornecer informações que tragam novos debates às tomadas de decisão em projetos de estruturas em aço, auxiliando engenheiros na escolha da solução estrutural mais adequada.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre perfis de aço celulares e perfis em alma cheia, aplicados a estruturas, visando avaliar a eficiência estrutural, o consumo de material e a viabilidade econômica de cada solução no contexto do dimensionamento estrutural. O estudo visa fornecer subsídios técnicos que auxiliem na escolha da solução mais adequada para um projeto por meio da identificação das diferenças, semelhanças, vantagens e limitações associadas a cada tipo de perfil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar estruturas de aço em alma cheia e celulares para diferentes vãos, considerando critérios de projeto e condições de carregamento equivalentes.
- Avaliar o comportamento estrutural das vigas analisadas, com base em parâmetros como resistência à flexão e deslocamentos, bem como outros modos de falha que se avalie relevantes.
- Avaliar a possibilidade de utilização de modelos equivalentes entre as tipologias de perfis, visando simplificar análises estruturais e comparações entre as alternativas estudadas.

- Comparar o consumo de material entre as diferentes tipologias de perfis, visando identificar soluções mais eficientes.
- Realizar um levantamento de ferramentas computacionais e referências da literatura aplicáveis ao dimensionamento de vigas com aberturas na alma, destacando suas limitações e campos de aplicação.
- Identificar, a partir dos resultados obtidos, as condições em que o uso de perfis alveolares se mostra mais vantajoso em relação aos perfis de alma cheia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PERFIS DE AÇO CONVENCIONAIS

2.1.1 Generalidades

Os perfis metálicos convencionais constituem a base dos sistemas estruturais em aço, sendo amplamente empregados em edificações e obras de infraestrutura devido à sua elevada eficiência mecânica e versatilidade de aplicação. Esses elementos são responsáveis por resistir aos esforços solicitantes por meio de seções transversais padronizadas, cuja geometria é definida de modo a otimizar o desempenho estrutural, especialmente sob ações de flexão, compressão e cisalhamento.

O processo de análise, entendimento e escolha do tipo adequado de material de origem faz parte do processo de dimensionamento dos perfis de aço. O aço estrutural para aplicação em perfis deve atender a requisitos de propriedades mecânicas adequados para a sua utilização em peças submetidas a tensões e deformações, além de corresponder adequadamente às exigências de durabilidade (Fakury, Silva e Caldas, 2016). Esses requisitos são estabelecidos por diferentes normatizações, que nomeiam o tipo de aço produzido. No Brasil, a gama de aços estruturais mais utilizada é a da normatização americana ASTM (*American Society for Testing and Materials*), com destaque para o A36, de classificação Aço-Carbono e A572, classificado como um Aço de Baixa Liga (Pfeil e Pfeil, 2009).

Além do tipo de aço utilizado, os perfis estruturais podem ser classificados quanto ao processo de fabricação e obtenção do produto final. Dentro deste espectro, deve-se citar os perfis laminados, os soldados e os formados à frio.

2.1.2 Perfis Laminados

Laminados são os perfis formados a partir do processo de laminação, procedimento de transformação mecânica de metais. O processo se inicia com o aquecimento do corpo de aço original, que é induzido posteriormente à ação de cilindros laminadores debastadores. Os rolos giratórios comprimem e conformam o corpo, reduzindo sua seção e alongando seu comprimento, em um procedimento que se repete progressivamente com as distâncias entre os cilindros cada vez menor. A Figura 3 mostra as progressivas fases do processo para a confecção de um perfil I laminado. Para se obter o produto final, o aço passa derradeiramente pelos

laminadores propriamente ditos, onde seus últimos detalhes são aparados (Pfeil e Pfeil, 2009; Fakury, Silva e Caldas, 2016; Machado, 2024).

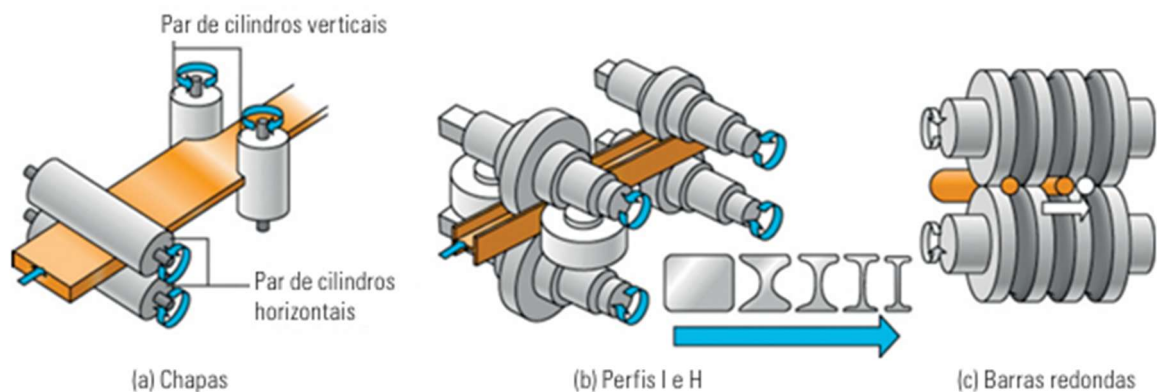
Figura 3 - Fases progressivas de laminação dos perfis I



Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil, 2009

Além de perfis estruturais de diferentes geometrias, a laminação transforma o aço em diversos outros produtos siderúrgicos, como chapas e barras. A Figura 4 traz exemplos de esquemas de laminação para os produtos siderúrgicos mencionados.

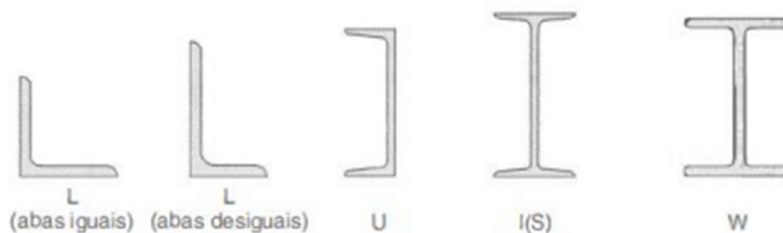
Figura 4 - Esquemas de laminação para chapas, perfis e barras



Fonte: Fakury, Silva e Caldas., 2016

Os perfis laminados são caracterizados por elevada uniformidade geométrica, produção em série e propriedades mecânicas bem definidas, o que favorece seu desempenho estrutural e sua ampla aplicação em sistemas estruturais. Entre as geometrias mais usuais, destacam-se as dos tipos I (S), H (W), L e U, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Geometrias usuais dos perfis laminados estruturais

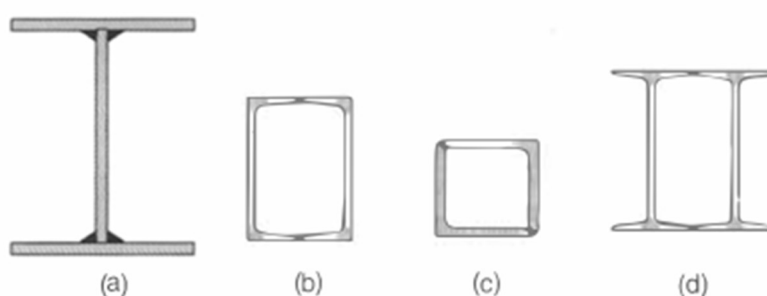


Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil, 2009

2.1.3 Perfis Soldados

Perfis soldados são aqueles obtidos através da ligação por solda de outros perfis ou chapas laminadas. Sua utilização geralmente se baseia na necessidade de seções transversais com dimensões maiores que as dos perfis laminados disponíveis (exemplos clássicos são perfis I ou H com altura ou largura maior que a fornecida pelos laminados). Outra motivação é baseada no interesse em se obter uma forma especial de seção transversal, como mostra a Figura 6, em decorrência de particularidades projetuais, estruturais ou arquitetônicas (Fakury, Silva e Caldas, 2016). Pfeil (2009) ainda acrescenta a possibilidade de se alcançar elevados momentos de inércia nas duas direções como mais uma justificativa para o emprego dos perfis soldados.

Figura 6 - Exemplos de perfis soldados

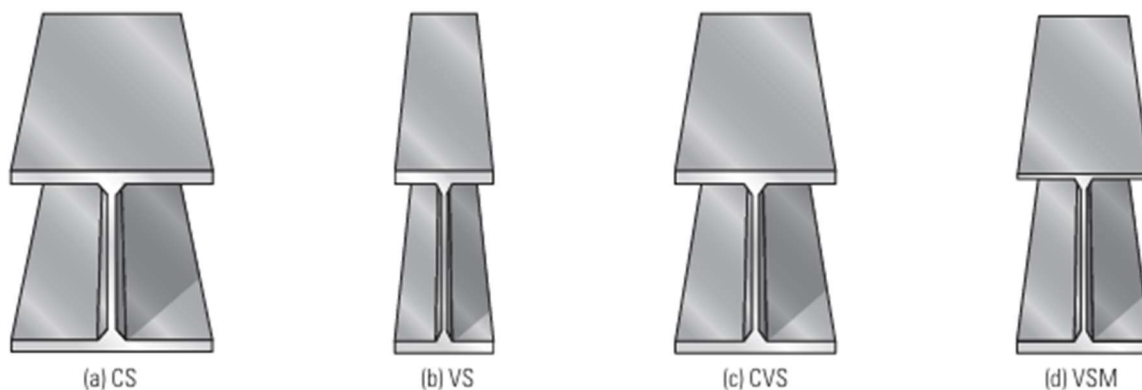


Fonte: Pfeil e Pfeil, 2009

Os perfis mais comuns são os tipos I ou H, constituídos pela ligação de três chapas cortadas em dimensões estabelecidas. A ABNT NBR 5884:2013 é a norma que padroniza os perfis soldados no Brasil, fixando requisitos e parâmetros de fabricação, além de classificar nas séries CS (Colunas Soldadas), VS (Vigas Soldadas), CVS (Colunas-Vigas Soldadas) e VSM (Vigas Soldadas Monossimétricas). Estas séries são padronizadas a partir de parâmetros

geométricos que relacionam altura (d) e largura da mesa (b_f), e podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 - Séries de perfis soldados



Fonte: Fakury, Silva e Caldas, 2016

A ABNT NBR 5884:2013 ainda estabelece a existência dos perfis dos tipos PS e PSM, como perfis soldados que não obedecem a uma relação pré-estabelecida entre suas dimensões, sendo gerados a partir da necessidade projetual. Com a crescente modernização dos setores siderúrgicos, contemplando processos automatizados de solda, estes perfis passaram a ser produzidos competitivamente em escala industrial (Pfeil, 2009).

2.1.4 Comportamento Estrutural

O comportamento estrutural dos perfis de aço é fundamentalmente determinado pelas propriedades mecânicas do material e pela geometria da seção transversal, sendo governado pela forma como esses elementos resistem aos esforços solicitantes. Em vigas e elementos lineares, instrumentos de comparação neste estudo, destacam-se principalmente os efeitos de flexão e cisalhamento, que atuam de maneira simultânea ao longo do comprimento da peça.

Enquanto a flexão está associada ao desenvolvimento de tensões normais distribuídas na seção, com máximos nas fibras extremas, o cisalhamento está relacionado às tensões tangenciais, predominantes na região da alma dos perfis. A adequada compreensão desses mecanismos é essencial para a avaliação do desempenho estrutural, uma vez que a resistência e a estabilidade dos elementos dependem tanto da capacidade resistente do material quanto da distribuição de tensões e deformações na seção (Pfeil e Pfeil, 2009).

Fakury, Silva e Caldas (2016) sintetizam a consideração dos esforços para o dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) das estruturas, prevendo modos de falha relacionados à atuação central de momentos fletores e esforços cortantes. Sob flexão, a bibliografia traz as possibilidades de colapso por plastificação total da seção transversal, por flambagem da viga (flambagem lateral com torção) e por flambagem local dos elementos que compõem o perfil. Enquanto a atuação dos esforços cisalhantes traz colapsos por escoamento e por flambagem local dos elementos da seção responsáveis por resistir ao esforço. Ainda deve se considerar a ação conjunta do momento fletor e dos esforços axiais, gerando esforço de flexão composta aos elementos.

Além da análise quanto à falha, os elementos da estrutura em aço devem ser também dimensionados quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS), considerando valores limites de deslocamentos (flechas) e vibrações da estrutura, estabelecidos por normas, como a NBR 8800:2024.

Diante da gama extensa de análises a serem realizadas a fim de aprovar estruturalmente (dimensionamentos quanto ao ELU e ao ELS) um modelo, o uso de ferramentas computacionais que consideram todos os modos de falha se mostra bastante útil. Nesta pesquisa os modelos previstos em perfis de alma cheia serão dimensionados através de um programa computacional, a ser apresentado posteriormente.

2.2 PERFIS COM ABERTURA NA ALMA

2.2.1 Generalidades

Como já explicado anteriormente, perfis com aberturas na alma, também conhecidos como perfis alveolares – por conta da semelhança das aberturas com os alvéolos dos favos de mel – são produtos de soluções adotadas para diversificar a gama de perfis estruturais em aço, advindas da primeira metade do século XX. Inicialmente, a produção deste tipo de solução se procedia através de cortes manuais auxiliados por gabaritos nas fábricas. A fabricação dos perfis alveolares cresceu, especialmente a partir da década de 1980, quando técnicas computadorizadas permitiram a evolução do processo de corte destes perfis. Dentre estas tecnologias, destacam-se as máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), representadas pela Figura 8, capazes de efetuar cortes das mais variadas geometrias na alma dos perfis laminados e soldados convencionais (Veríssimo et al., 2025).

Figura 8 - Cortes efetuados por Máquinas CNC



Fonte: ArcelorMittal Europe, 2021

Os perfis originais podem ser tanto laminados quanto soldados e a geometria dos cortes pode variar de acordo com a finalidade construtiva, podendo se dar na forma circular, quadrada, retangular, hexagonal, octogonal e até outros formatos mais irregulares, como traz o Manual de Vigas Celulares da ArcelorMittal (2025). Este trabalho, porém, tem o objetivo de explorar as características das geometrias mais comumente empregadas, ou seja, hexagonais e octogonais (perfis castelados) e, especialmente, circulares (perfis celulares), esta última sendo o foco do processo de dimensionamento que irá nortear a comparação com os perfis convencionais de alma cheia.

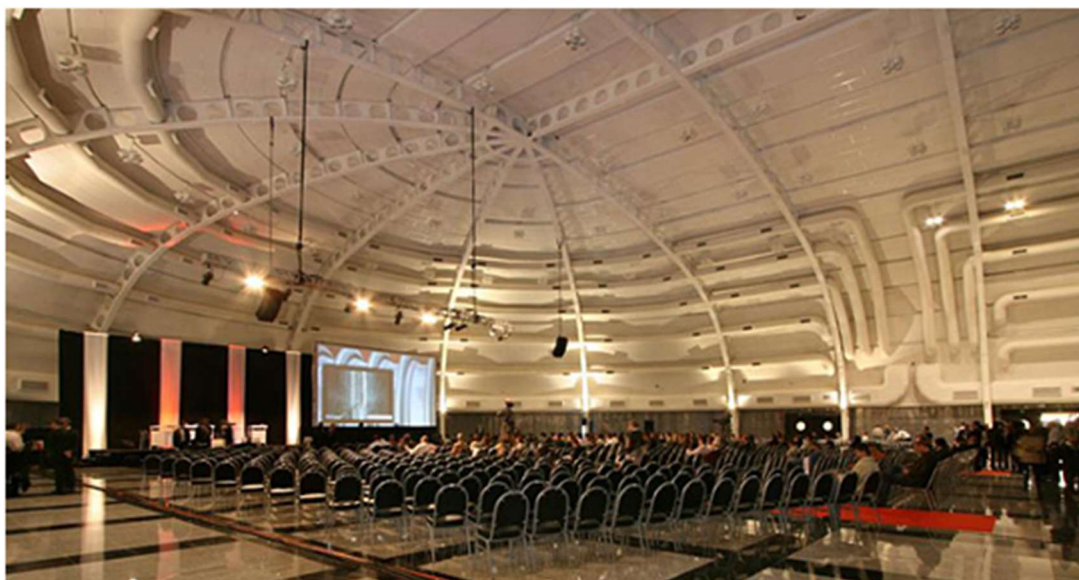
2.2.2 Aplicações

De modo geral, a gama de aplicação dos perfis alveolares é bem ampla, sendo indicados para situações de grandes vãos e carregamentos uniformemente distribuídos, onde se otimiza estruturalmente o comportamento da viga, além de estruturas que demandem maior compatibilização com as instalações e a arquitetura. Instrumento central desta pesquisa, os perfis celulares são amplamente utilizados tanto para sistema de piso, como sistemas de cobertura, com algumas distinções nos processos de dimensionamento.

O ganho de inércia em relação ao perfil de alma cheia original, gerado pelo aumento da altura da seção, permite aos perfis alveolares demonstrar melhor comportamento estrutural para situações em que a deformação condiciona o dimensionamento, como grandes vãos (Ferreira et. al, 2015). Por este motivo, os sistemas de cobertura estão entre as aplicações mais usuais dos perfis celulares, uma vez que geralmente traz carregamento relativamente baixo e de forma distribuída, situações tratadas como favoráveis. Locais comumente contemplados incluem

supermercados, concessionárias de automóveis, ginásios, academias, centros de convenções, dentre outros exemplos (Veríssimo e Sakiyama, 2025). As Figuras 9 e 10 mostram algumas aplicações deste tipo, contemplando vigas celulares de eixo reto e curvo.

Figura 9 - Aplicação de perfis celulares no Centro de Convenções do World Trade Center



Fonte: VALEMAM Perfis Metálicos, s.d.

Figura 10 - Aplicação de vigas curvas celulares no Liverpool FC Academy



Fonte: Westok, 2011 *apud* ArcelorMittal, 2025

Na Figura 10, é possível ver 44m de vão vencidos através da viga celular de eixo curvo, propiciando espaço livre para o campo do centro de treinamento. Adicionalmente, pode-se perceber o efeito de passagem de luz natural através dos alvéolos, outra importante vantagem deste sistema.

É muito comum encontrar, especialmente no Brasil, grandes vãos vencidos por estruturas treliçadas. O uso de vigas celulares, porém, pode trazer vantagens em relação às treliças, como tempo de fabricação, número de peças, rapidez e praticidade de montagem e custo de mão de obra (Veríssimo et al., 2025).

Outra alternativa são as vigas celulares de altura variável, otimizadas para combater os esforços de forma proporcional ao longo do vão, como coberturas em balanço por exemplo. Neste caso, as vigas tendem a ficar mais aptas ao modo de falha decorrente da interação entre esforço cortante e momento fletor na região do apoio, por este motivo é comum o preenchimento do furo na região (Grünbauer, 2016 *apud* Moro, 2021), como mostra a Figura 11. Nesta imagem é possível ver 26m de vão vencidos pelas vigas celulares.

Figura 11 - Aplicação de vigas celulares de altura variável na cobertura do Hull KC Stadium



Fonte: Westok, 2011 *apud* ArcelorMittal, 2025

Sistemas de piso também fazem parte do escopo de aplicações dos perfis celulares, principalmente por permitir maior flexibilidade de layout do espaço com a redução do número de pilares. Um exemplo clássico são os pavimentos de garagem de edifícios, onde o vão usual combina perfeitamente com os vãos típicos para vigas celulares aplicadas a estes sistemas (VERÍSSIMO et al., 2025). A Figura 12 traz um exemplo desta aplicação clássica.

Figura 12 - Vigas celulares aplicadas em estacionamentos



Fonte: ArcelorMittal, 2025

A utilização de vigas celulares também se dá pela necessidade da integração da estrutura com os sistemas de instalações prediais, como tubulações hidráulicas e sanitárias, instalações elétricas, além de dutos de sistemas de climatização e ventilação, como mostra a Figura 13. A presença de aberturas reduz a necessidade de desvios nas instalações e de rebaixos de forro, contribuindo para uma melhor integração entre estrutura e arquitetura. Considerando edificações modernas em que se demanda um número cada vez maior de instalações técnicas, essa característica se configura uma grande vantagem ao sistema.

Figura 13 - Passagem de dutos pelos alvéolos



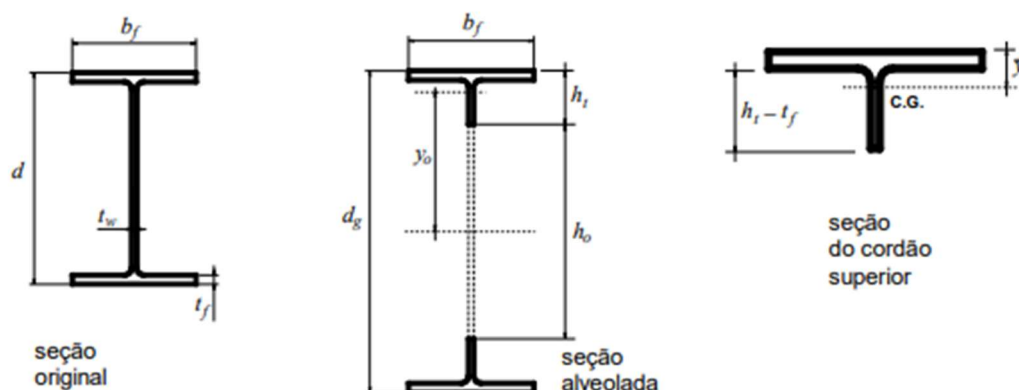
Fonte: ArcelorMittal, 2021

Por fim, uma outra aplicação para os perfis alveolares se trata da requalificação e modernização de estruturas antigas. Com o intuito de preservar o patrimônio arquitetônico, os perfis com aberturas trazem intervenções menos agressivas às novas estruturas, combinando leveza visual com desempenho estrutural (Arcelor Mittal, 2025).

2.2.3 Nomenclatura e Simbologia

A nomenclatura das partes constituintes destes perfis difere em relação às usuais para perfis convencionais, devido à suas peculiaridades de seção. A seção transversal dos perfis alveolares, representada pela Figura 14, é dada pela formação dos “tês” superior e inferior, obtidos a partir do corte do perfil original.

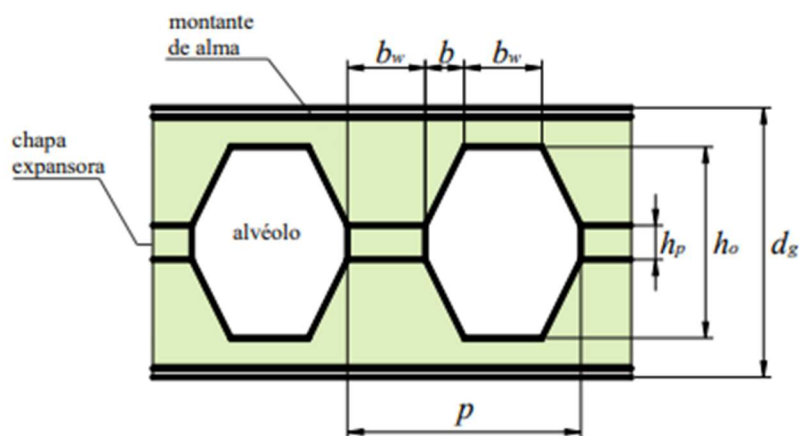
Figura 14 - Simbologia da seção transversal dos perfis alveolares



Fonte: Veríssimo, *et. al.*, 2012

As simbologias das seções longitudinais de perfis castelados e perfis celulares, são representadas, respectivamente, pelas Figuras 15 e 16. De maneira geral, o trecho de alma que recebe a solda entre duas aberturas é chamado de montante da alma, enquanto a distância entre centros de duas aberturas adjacentes recebe o nome de espaçamento ou passo da viga (Veríssimo e Sakiyama, 2025).

Figura 15 - Simbologia da seção longitudinal de perfis castelados



Fonte: Veríssimo, *et al.*, 2012

Onde:

b_w é a menor largura do montante da alma em perfis castelados;

b é a projeção horizontal do lado inclinado da abertura;

p é a distância entre centros de alvéolos adjacentes, ou passo, em perfis castelados;

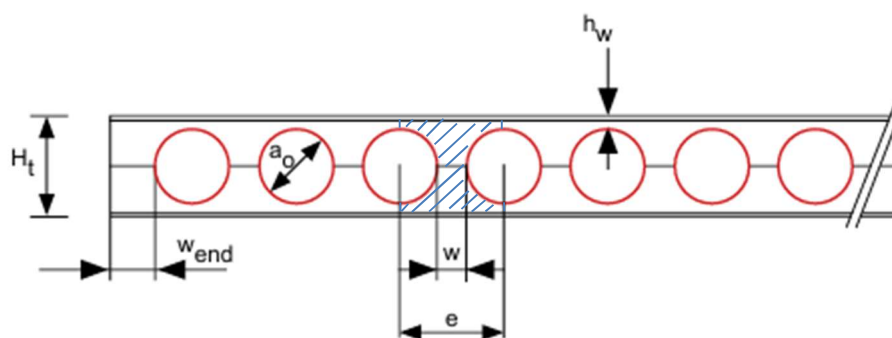
h_p é a altura da chapa expansora (se houver);

h_o é a altura do alvéolo;

d_s é a altura total do perfil castelado expandido.

Importante ressaltar que as dimensões adotadas para cada parte constituinte das vigas casteladas, depende diretamente do padrão de castelação adotado, com destaque para os padrões Anglo-Saxão, Litzka e Peiner. O detalhamento destes, porém, não faz parte do instrumento de pesquisa deste trabalho.

Figura 16 - Simbologia da seção longitudinal de perfis celulares



Fonte: ArcelorMittal Europe, 2021

Onde:

w é a menor largura do montante da alma, representada pela área hachurada;

w_{end} é a largura do montante de alma extremo;

e é a distância entre centros de alvéolos adjacentes, ou passo da viga;

a_o é o diâmetro das aberturas;

h_w é a altura da seção “T” no centro de uma abertura;

H_t é a altura total do perfil expandido;

Para fins de padronização, a nomenclatura representada na Figura 16 para vigas celulares será a adotada para todo o trabalho.

2.2.4 Efeito Estrutural das Aberturas na Alma

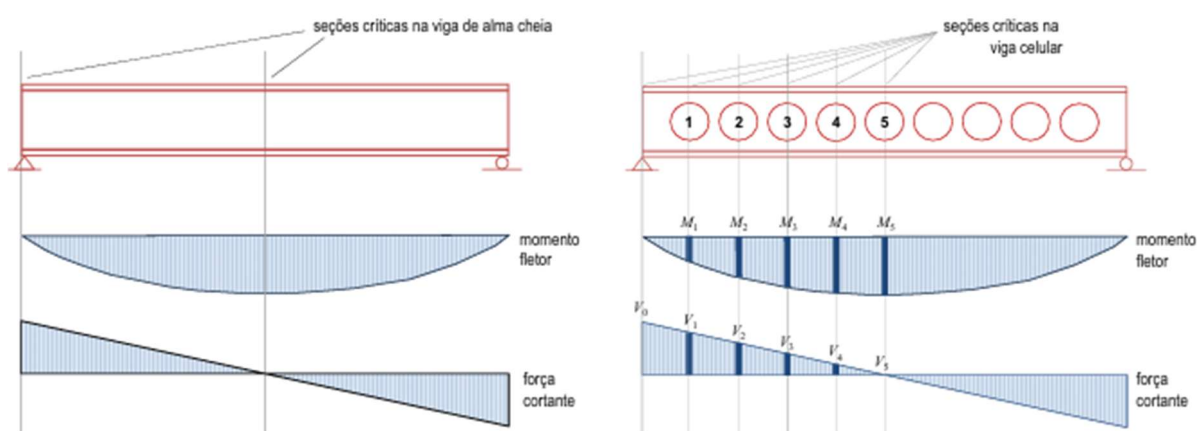
A literatura mostra que a configuração geométrica dos perfis I leva ao comportamento estrutural em que as mesas se tornam responsáveis pela absorção dos esforços de flexão, enquanto a alma atua principalmente na resistência ao cisalhamento. Nessas condições, ao longo do vão da viga, a combinação entre momento fletor e força cortante geralmente não se apresenta mais crítica do que seus valores máximos isolados, permitindo, em muitos casos, a verificação independente desses esforços.

Veríssimo *et al.* (2025) trazem em seu estudo que, a partir da introdução de aberturas na alma, novos aspectos passam a se tornar relevantes, como:

- A diminuição da área resistente ao cisalhamento;
- A modificação do funcionamento estrutural da porção remanescente da alma que passa a se comportar como elementos apoiado-livres, diferentemente da condição apoiado-apoiado típica;
- A redistribuição das tensões na seção, resultando na concentração de tensões normais e de cisalhamento na proximidade das aberturas.

Em função desta concentração, a interação entre momento fletor e força cortante torna-se relevante e não pode ser negligenciada, sendo necessária sua verificação conjunta. A Figura 17 mostra a diferença para a consideração de seções críticas entre perfis I de alma cheia e perfis alveolares, dada pelos aspectos percorridos.

Figura 17 - Seções críticas



Fonte: Veríssimo *et al.*, 2025

2.2.5 Modos de Falha

É visto, portanto, que vigas com aberturas na alma, apresentam comportamento estrutural mais complexo quando comparadas às vigas de alma cheia. A presença de descontinuidades geométricas modifica a distribuição de tensões e introduz novos mecanismos resistentes, resultando também em modos de falha adicionais. De modo geral, os modos de falha dessas vigas dependem de fatores como a geometria das aberturas, a esbeltez dos

elementos da seção e as condições de carregamento, podendo envolver tanto mecanismos globais quanto locais (Bellon, 2021).

Além das falhas devido aos esforços nas seções críticas e às interações entre eles (N+V, N+M, V+M e N+V+M), outros modos de ruptura devem ser considerados para as vigas alveolares, conforme detalhado nos itens 2.2.4.1 a 2.2.4.4:

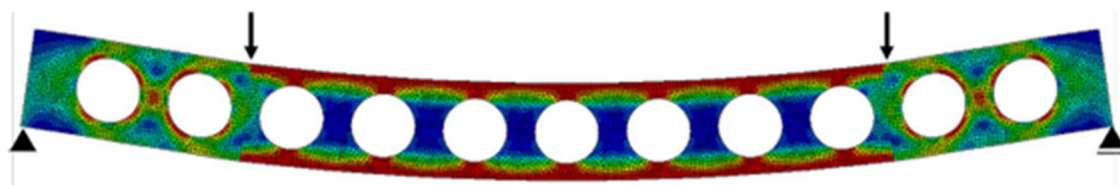
2.2.5.1 Formação do mecanismo plástico

O colapso por formação de mecanismo plástico ocorre quando há plastificação progressiva dos elementos da seção, culminando na formação de rótulas plásticas ao longo da viga. Em vigas com aberturas, esse mecanismo pode se dar de duas formas:

- Formação de duas rótulas plásticas

Comum para vigas com número ímpar de aberturas. As duas rótulas se dão nas menores seções dos “tês” superior e inferior, devido à ação isolada do momento fletor máximo no meio do vão, coincidente com o centro de uma abertura (Veríssimo e Sakiyama, 2025). Uma situação de ocorrência deste mecanismo é a partir da ação de duas forças concentradas simétricas, que podem submeter à região entre as forças à uma espécie de flexão pura. Os “tês” englobados nesta região podem vir a atingir o limite de escoamento e gerar a formação das rótulas plásticas (Grilo, 2018). A Figura 18 traz a deformada de uma viga com a formação do mecanismo a partir da situação mencionada.

Figura 18 - Formação de rótulas plásticas devido à ação de momento fletor



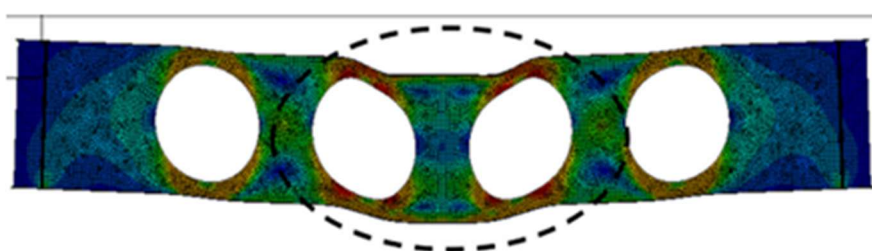
Fonte: Grilo, 2018

- Formação de quatro rótulas plásticas ou Mecanismo Vierendeel

Mais comum para casos com número par de aberturas, com a seção central da viga coincidindo com um montante de alma. O mecanismo se dá pela interação entre as tensões de cisalhamento e tensões normais, decorrentes do esforço cortante e do momento fletor

respectivamente. Esta ação conjunta leva ao surgimento de quatro rótulas ao redor da abertura e sua distorção para uma geometria mais ovalada (Veríssimo e Sakiyama, 2025), como mostra a deformada representada na Figura 19. Este mecanismo é tratado como um dos principais agentes de ruptura nas vigas com aberturas e é estudado através de diferentes metodologias desde a introdução dos perfis castelados, nos quais também é considerado crítico (Kerdal e Nethercot, 1984; Chung et al, 2003).

Figura 19 - Formação do Mecanismo de Vierendeel



Fonte: Grilo, 2018

2.2.5.2 Flambagem Lateral com Torção (FLT)

A FLT é um modo de falha comum entre perfis de alma cheia e perfis alveolares, expressada por meio de translação lateral e torção da viga. Kerdal e Nethercot (1984) trouxeram em sua pesquisa um estudo que comprova a proximidade do comportamento dos perfis alveolares submetidos à FLT comparado aos perfis convencionais. Enquanto a NBR 8800:2024 limita seu escopo às vigas de alma cheia para análise deste modo de falha, a norma britânica BS 5950-1: 2000 traz uma regra de verificação que consiste no emprego de expressões semelhantes às adotadas para vigas de alma cheia, porém considerando as propriedades geométricas da seção transversal líquida no centro das aberturas (Abreu, 2011). Desde então, modelos próprios para o cálculo da FLT em perfis alveolares foram desenvolvidos, considerando tais adaptações. A Figura 20 ilustra uma viga alveolar submetida à FLT.

Figura 20 - Flambagem Lateral com Torção



Fonte: Kerdal e Nethercot, 1984

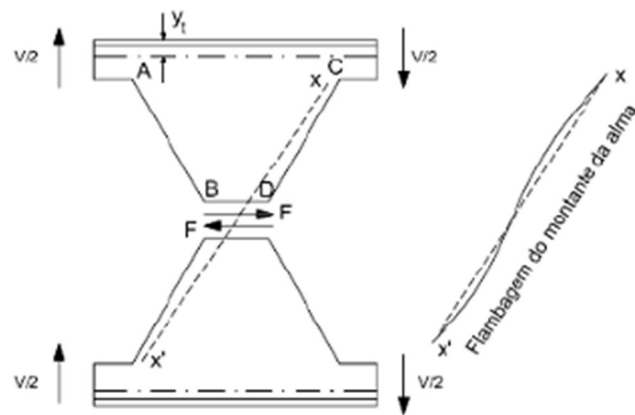
2.2.5.3 Flambagem do Montante de Alma (FMA)

Os montantes de alma, regiões entre as aberturas, estão sujeitos a elevados níveis de tensão e podem apresentar instabilidade local, geralmente relacionada à esbeltez do elemento e a redução da área resistente. Entre os principais mecanismos destacam-se a flambagem por cisalhamento e a flambagem por compressão, conforme detalhado na sequência.

- Flambagem por cisalhamento

Esta falha se dá pelo momento fletor gerado no montante de alma através do efeito do esforço cortante que atua na solda. Grilo (2018) e Veríssimo e Sakiyama (2025) estabelecem um painel retangular que envolve o montante de alma, que ao sofrer distorção produz duas diagonais, uma delas submetida à compressão e outra à tração. A diagonal tracionada exerce um efeito de estabilização sobre a região central da diagonal comprimida, permitindo que esta apresente um modo de flambagem caracterizado por duas ondulações. A Figura 21 mostra o modelo produzido por Kerdal e Nethercot, (1984), que representa a diagonal tracionada como AB e a comprimida como CD.

Figura 21 - Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento

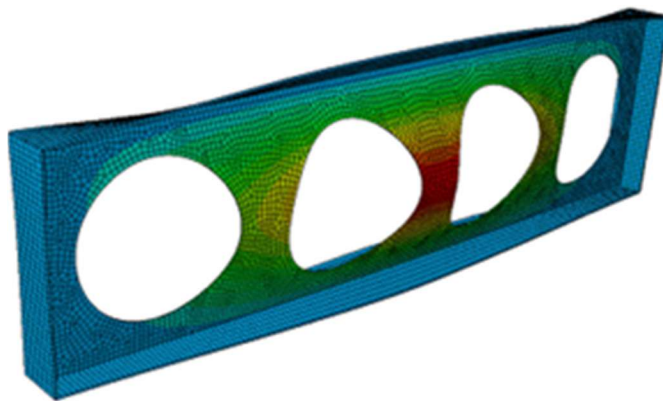


Fonte: Kerdal e Nethercot, 1984

- Flambagem por compressão

Neste modo de falha, os montantes de alma se encontram comprimidos pela mesa do perfil, devido à ação do momento fletor. A compressão gera um deslocamento do montante de alma para fora do plano da viga, sem que haja torção, como ilustra a Figura 22. É mais comum para vigas sujeitas a carregamento concentrado (Brinkhus, 2015; Veríssimo e Sakiyama, 2025).

Figura 22 - Flambagem do Montante de Alma por compressão



Fonte: Veríssimo e Sakiyama, 2025

2.2.5.4 Ruptura da região soldada

Este modo de falha, representado na Figura 23, ocorre quando as tensões solicitantes no local da solda ultrapassam a tensão de escoamento do material da ligação. A geometria do montante de alma é fator primordial para a ocorrência deste tipo de ruptura. Estudos de Hosain e Speirs (1970 *apud* Kerdal e Nethercot, 1984), porém, mostraram que outros mecanismos de

ruptura são mais frequentes em vigas alveolares do que o escoamento do montante de alma na junta soldada. Com o passar do tempo, padrões foram deduzidos para relacionar dimensões das aberturas e dos comprimentos de solda, com o intuito de reduzir a probabilidade de rupturas deste modo (Rezaei, 2016).

Figura 23 - Escoamento do Montante de Alma na junta soldada



Fonte: Tsavdaridis e D'Mello, 2011

Em razão da pequena presença dos perfis alveolares em normas técnicas, seu comportamento estrutural ainda é instrumento de estudo na literatura técnica, existindo diversas abordagens e metodologias para a verificação de sua capacidade resistente diante todos os modos de falha possíveis e retratados. Devido à natureza dos elementos, caracterizados por seções variáveis e geometrias diversificadas, os modelos de análise tendem a apresentar maior complexidade, o que dificulta sua aplicação por meio de procedimentos manuais e torna o uso de ferramentas computacionais mais adequado (Veríssimo *et. al*, 2025).

A ArcelorMittal, por meio dos professores Gustavo Veríssimo e Felipe Sakiyama, desenvolveu no ano de 2025, o programa VCA+, capaz de verificar o dimensionamento de vigas celulares das mais distintas geometrias e formas, quanto aos Estados Limites Último e de Serviço, considerando os modos de falha mais frequentes para os elementos, incluindo seu desempenho perante ao fogo. Este programa será utilizado no trabalho para sintetizar o dimensionamento dos perfis alveolares considerados.

3 METODOLOGIA

Conforme apresentado nos tópicos de justificativa e objetivos, a pesquisa visa estabelecer uma comparação entre o comportamento estrutural de perfis de aço em alma cheia e perfis de aço celulares. Para isso, foram dimensionados 6 modelos de pórtico para as duas tipologias, considerando Estados Limites Últimos e Estados Limites de Serviço, permitindo traçar uma relação entre o consumo de aço e peso da estrutura ao final da análise.

O processo de dimensionamento dos perfis em alma cheia foi realizado através das sequenciais fases de pré-dimensionamento, análise quanto à deformação excessiva (ELS), dimensionamento quanto ao ELU e síntese das seções adotadas em planilhas para posterior comparação.

Para os perfis celulares a metodologia adotada seguiu a sequência de pré-dimensionamento de acordo com informações da literatura, abordando o dimensionamento quanto ao colapso (ELU), análise quanto à flecha (ELS) e síntese das seções originais e finais em planilha para comparação com os perfis em alma cheia quanto ao consumo de aço e peso final da estrutura. Os programas utilizados para as etapas são apresentados no tópico 3.2.

A proposta consiste em gerar subsídios técnicos, ao final do processo de dimensionamento e compilação dos resultados, capazes de fundamentar a análise comparativa entre as soluções estruturais estudadas. Em relação ao consumo de aço, a comparação foi realizada entre os perfis de alma cheia obtidos após o dimensionamento e os perfis de origem utilizados na fabricação dos perfis celulares, ou seja, antes do processo de expansão da alma. A análise foi conduzida individualmente para cada elemento constituinte dos pórticos, permitindo uma avaliação mais detalhada do comportamento e da eficiência de cada solução.

No que se refere ao peso estrutural, a comparação foi realizada considerando o peso total dos pórticos em cada configuração analisada. Dessa forma, buscou-se avaliar o impacto efetivo da utilização de aberturas na alma dos perfis sobre o peso global da estrutura, possibilitando uma análise mais representativa da eficiência estrutural proporcionada pelos perfis celulares.

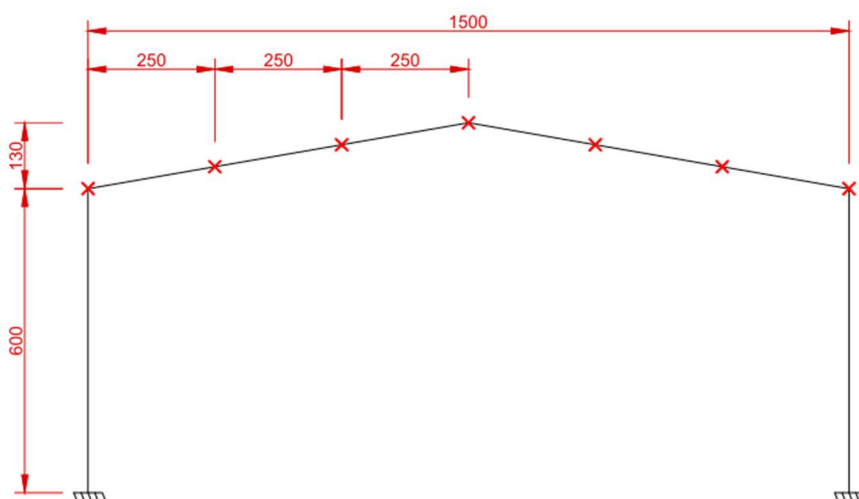
3.1. MODELOS

Para a definição dos pórticos a serem dimensionados, foram consideradas 3 dimensões de vãos (15, 25 e 35 metros), bem como 2 alturas para os pilares (6 e 10 metros), resultando em um total de 6 pórticos. Foi considerada a distância entre terças de 2,5 metros horizontalmente, funcionando como travamento das vigas (em conjunto com as mãos francesas), enquanto para os pilares foi empregado travamento apenas para aquele com 10 metros, em sua altura média. A distância entre pórticos adotada foi de 6 metros, prevendo um galpão com 54 metros de comprimento. Para a inclinação das vigas do pórtico foi considerado o valor de 10° .

Foram adotados perfis soldados tanto para as soluções em alma cheia quanto para as soluções com vigas celulares. A adoção desse critério decorre da disponibilidade de um catálogo de perfis celulares soldados, fornecido pela ArcelorMittal, desenvolvido especificamente para esse tipo de aplicação. Com isso, buscou-se padronizar os modelos estruturais analisados, garantindo maior consistência na comparação entre as alternativas estudadas.

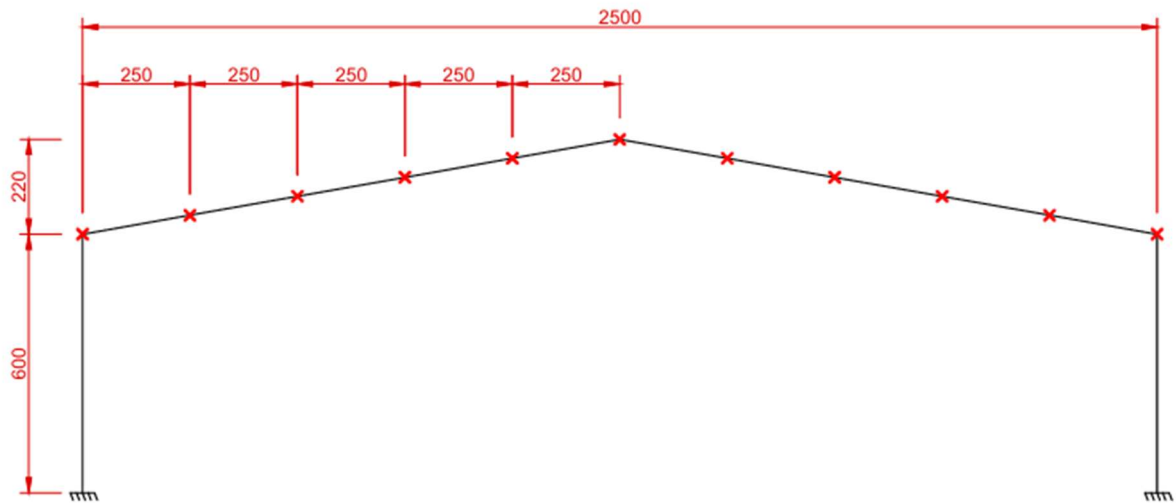
As Figuras 24, 25, 26, 27, 28 e 29 ilustram os seis pórticos modelados para as análises do trabalho. As dimensões estão em centímetros.

Figura 24 - Modelo 1 (Pórtico 6-15)



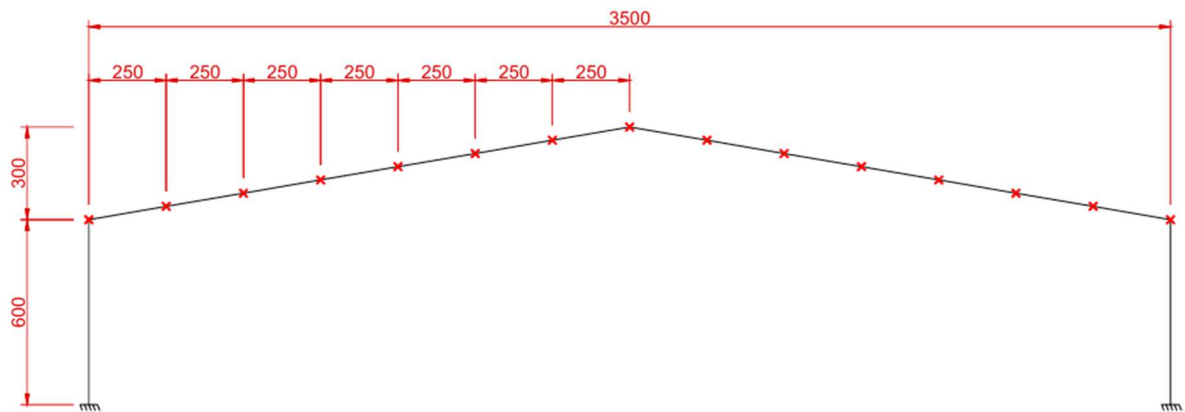
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 25 - Modelo 2 (Pórtico 6-25)



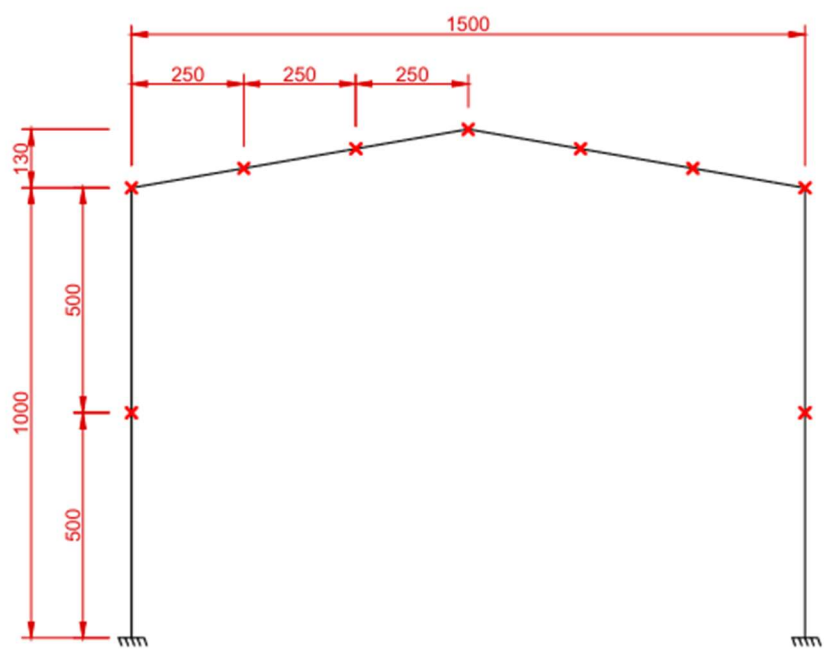
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 26 - Modelo 3 (Pórtico 6-35)



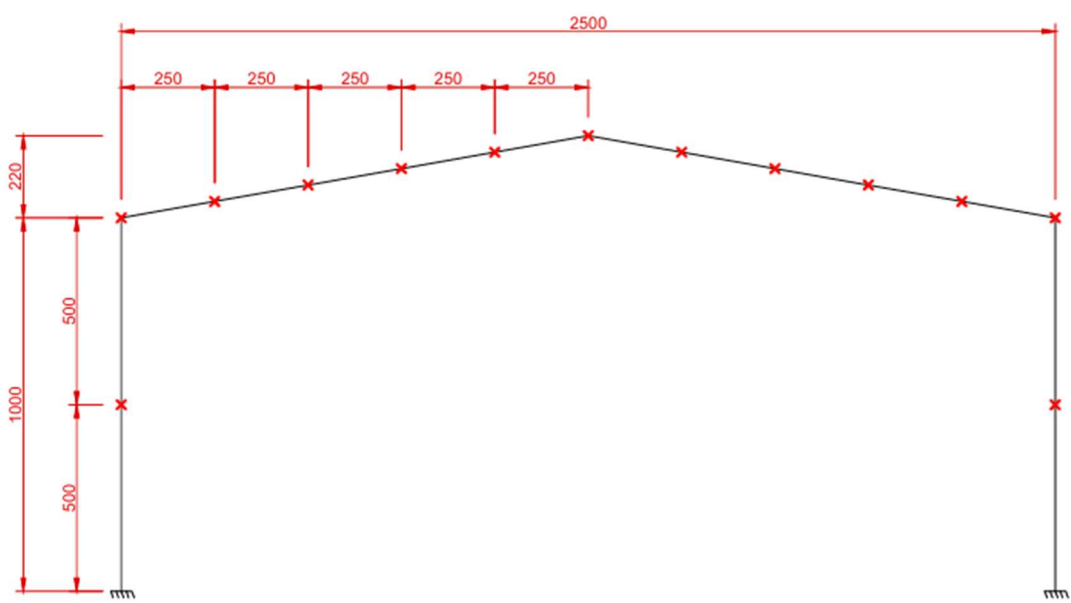
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 27 - Modelo 4 (Pórtico 10-15)



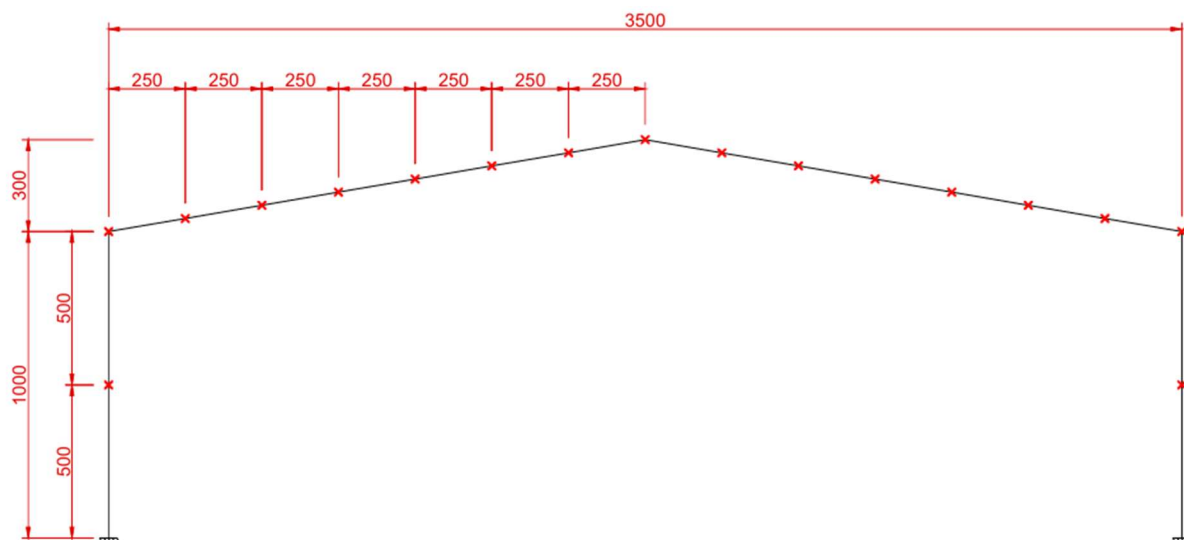
Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 28 - Modelo 5 (Pórtico 10-25)



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 29 - Modelo 6 (Pórtico 10-35)



Fonte: Autoria própria, 2026

3.2. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

Para o desenvolvimento das análises estruturais deste trabalho, foram empregados diferentes programas de cálculo e dimensionamento, de acordo com as particularidades de cada modelo estudado. Os modelos de pórticos compostos por perfis de aço em alma cheia foram analisados e dimensionados por meio do programa SAP2000, amplamente utilizado na engenharia estrutural para modelagem, análise numérica e dimensionamento de estruturas. Nesse caso, foram realizadas verificações tanto para o Estado Limite Último (ELU), relacionados à segurança estrutural, quanto para o Estado Limite de Serviço (ELS), associados ao desempenho e às deformações da estrutura, seguindo parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2024.

Para os modelos compostos por vigas celulares, foi utilizado o programa VCA+, disponibilizado pela ArcelorMittal Brasil, desenvolvido pelos professores Gustavo Veríssimo e Felipe Sakiyama. A ferramenta é específica para o dimensionamento de vigas alveolares, permitindo a verificação dos principais modos de falha associados a esse tipo de elemento estrutural, detalhados anteriormente. O programa é capaz de realizar a avaliação dos critérios de resistência (ELU) e deslocamentos e vibrações previstas em projeto (ELS). Dessa forma, a utilização conjunta dos programas possibilita uma análise comparativa mais adequada entre os diferentes sistemas estruturais estudados.

Como o programa VCA+ foi desenvolvido para o dimensionamento de vigas isoladas, e não para a análise direta de sistemas estruturais aporticados, se fez necessária a adoção de adaptações metodológicas para sua aplicação neste trabalho. Essas adaptações envolvem tanto os procedimentos de verificação estrutural — especialmente no que se refere às análises no Estado Limite de Serviço (ELS) — quanto a definição de modelos estruturais equivalentes, capazes de representar de forma mais adequada as condições reais de funcionamento dos pórticos analisados.

Os procedimentos adotados, bem como as adaptações metodológicas necessárias à aplicação do programa nas análises propostas, são apresentados de forma mais detalhada no tópico referente ao dimensionamento das vigas celulares.

4 DIMENSIONAMENTO

4.1 CARREGAMENTO

A definição dos casos de carregamento adotados nas análises estruturais foi baseada nas prescrições das normas ABNT NBR 6120:2019 — *Ações para o cálculo de estruturas de edificações*, ABNT NBR 8681:2025 — *Ações e segurança nas estruturas* e ABNT NBR 8800:2024 — *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações*. Conforme a ABNT NBR 8681:2025, as ações atuantes nas estruturas são classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais, de acordo com sua variabilidade ao longo da vida útil da estrutura. Para os fins deste trabalho, foram consideradas apenas as ações permanentes e variáveis para a composição dos casos de carregamento e das combinações de ações, por representarem as solicitações efetivamente atuantes nas condições usuais dos pórticos analisados.

4.1.1 Ações Permanentes

A ABNT NBR 8681:2025 define como ações permanentes diretas os pesos próprios dos elementos da construção, considerando peso da estrutura e dos elementos construtivos permanentes. Como elementos da estrutura, consideram-se os perfis em aço que formam os pórticos, as telhas, as terças e seus acessórios de fixação, bem como elementos de contraventamento.

Os pesos próprios dos perfis considerados variam com as seções adotadas, sendo automaticamente computados pelos programas SAP2000 e VCA+ a partir da inserção do perfil.

Para a cobertura, foi considerada a utilização de telhas trapezoidais termoacústicas. Adotou-se um peso próprio de $0,10 \text{ kN/m}^2$, valor amplamente empregado na literatura técnica e em estudos de pré-dimensionamento de estruturas em aço para representar esse tipo de sistema de cobertura. Tal valor foi utilizado como carregamento permanente atuante sobre a superfície da cobertura em todos os modelos analisados. Além do peso próprio das telhas, foi considerado um carregamento permanente adicional de $0,06 \text{ kN/m}^2$ destinado a representar o peso das terças, elementos de fixação e demais componentes secundários do sistema de cobertura.

O conjunto da cobertura com telhas, terças, acessórios de fixação e contraventamentos, portanto, resultou no peso de $0,16 \text{ kN/m}^2$. Como detalhado anteriormente na descrição da

geometria do galpão, a distância entre pórticos adotada foi de 6 metros. Com isso, o valor do carregamento distribuído referente ao conjunto pôde ser obtido através da Equação 1.

$$CP = 0,16 \text{ kN/m}^2 * 6\text{m} = 0,96 \text{ kN/m} \quad (1)$$

4.1.2 Ações Variáveis

No que se refere às ações variáveis, foram consideradas a **sobrecarga de utilização e as ações do vento**. A sobrecarga foi definida com base nos valores prescritos pela ABNT NBR 6120:2019, enquanto as ações do vento foram determinadas por meio do software VisualVentos, ferramenta desenvolvida para a aplicação dos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 6123:2023 – *Forças devidas ao vento em edificações*. Os tópicos 4.1.2.1 e 4.1.2.2 detalham os valores considerados.

4.1.2.1 Sobrecarga de Utilização

Para a sobrecarga de utilização, foi considerado o valor de 0,25 kN/m², normatizado como o mínimo para coberturas pela NBR 6120:2019.

Assim como no cálculo da carga permanente associada à cobertura, a conversão da sobrecarga de utilização de carga superficial para carga linear foi realizada por meio da multiplicação do valor da sobrecarga por unidade de área pelo espaçamento entre os pórticos. O procedimento adotado é apresentado na Equação 2.

$$SC = 0,25 \text{ kN/m}^2 * 6\text{m} = 1,5 \text{ kN/m} \quad (2)$$

4.1.2.2 Ação do Vento

Conforme mencionado, a determinação da ação do vento foi realizada com o auxílio do programa VisualVentos, cuja metodologia de cálculo é fundamentada nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6123:2023. A ferramenta possibilita a avaliação das pressões de vento a partir da geometria da edificação e dos parâmetros de projeto definidos pelo usuário. A Figura 30 ilustra a interface inicial do programa, destacando os dados geométricos adotados para o Modelo 1 (Pórtico 6-15).

Figura 30 - Inserção da geometria da estrutura no programa VisualVentos

Geometria

Dimensões

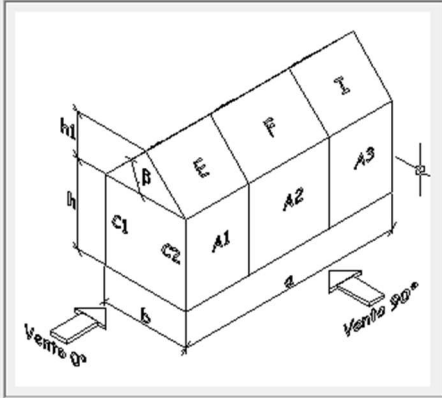
Medidas

b 15 m a 54 m h 6 m Distância entre pórticos p 6 m

b1 7,50 m a1 12,00 m β 10° h1 1,32 m

a2 15,00 m

Confirmar



Área das aberturas

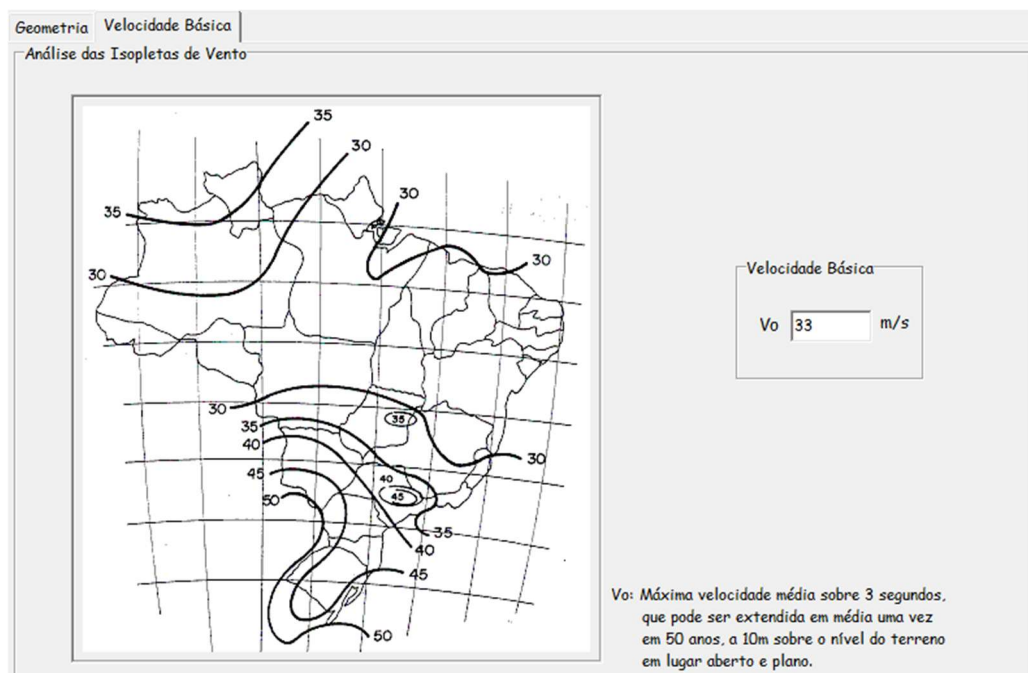
Face	Fixa	Móvel
A1	0 m²	0 m²
A2	0 m²	0 m²
A3	0 m²	0 m²
B1	0 m²	0 m²
B2	0 m²	0 m²
B3	0 m²	0 m²
C1	0 m²	0 m²
C2	0 m²	0 m²
D1	0 m²	0 m²
D2	0 m²	0 m²

Continuar →

Fonte: VisualVentos, 2026

Para prosseguimento do cálculo, é necessário a definição dos parâmetros de projeto nas abas subsequentes do VisualVentos. Dentre esses parâmetros, destaca-se a velocidade básica do vento, cuja determinação é realizada com base nas isopletras apresentadas pela ABNT NBR 6123:2023. Considerando-se, para os fins deste estudo, a implantação da estrutura no município de Juiz de Fora/MG, adotou-se a velocidade básica do vento de 33 m/s, obtida a partir da interpretação da carta disponibilizada pela norma e ilustrada no programa. A Figura 31 apresenta tela de inserção do dado no programa.

Figura 31 - Definição da velocidade básica do vento



Fonte: VisualVentos, 2026

Outros parâmetros definidos para a determinação da ação do vento foram os fatores topográfico (S_1), de rugosidade (S_2) e estatístico (S_3). Os valores adotados para esses coeficientes são apresentados na Figura 32, sendo o fator topográfico representado na Figura 32(a), o fator de rugosidade na Figura 32(b) e o fator estatístico na Figura 32(c). A determinação desses parâmetros é realizada automaticamente pelo programa a partir das informações previamente fornecidas pelo usuário, tais como localização da edificação, características do terreno, dimensões da estrutura e categoria de utilização. Para os demais modelos analisados, observam-se pequenas variações nos coeficientes calculados, decorrentes das diferenças geométricas entre os pórticos. Entretanto, o procedimento de obtenção dos parâmetros permanece o mesmo, sendo conduzido de forma análoga à apresentada para o Modelo 1 (Pórtico 6-15).

Figura 32 - Definição dos Fatores S_1 , S_2 e S_3 adotados para o cálculo

(a) Fator Topográfico – S_1

Fator Topográfico

Pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na figura.

Fator S_1

☒ Terreno plano ou fracamente acidentado

☐ Talude e Morros

☐ Vales profundos, protegidos de vento de qual quer direção

Taludes e Morros

ϕ °

z m

d m

Calcular

S_1

Fonte: VisualVentos, 2026

(b) Fator de Rugosidade – S_2

Fator de Rugosidade

Categoria	Descrição do ambiente
☐ I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
☐ II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1m. Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.
☐ III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3m. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
☒ IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
☐ V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m. Exemplos: florestas com árvores altas de copas isoladas; centros de grandes cidade; complexo industriais bem desenvolvidos.

Classe de edificação

Classe	Descrição
☐ A	Maior dimensão menor ou igual a 20m
☐ B	Maior dimensão entre 20 e 50m
☒ C	Maior dimensão maior ou igual 50m

Maior dimensão m

Fator S_2

S_2

Calcular

[← Voltar](#) [Continuar →](#)

Fonte: VisualVentos, 2026

c) Fator Estatístico – S_3

Fator Estatístico

Grupo	Descrição
☐ 1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros, centrais de comunicação, etc)
☒ 2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação
☐ 3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc)
☐ 4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)
☐ 5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção

S3

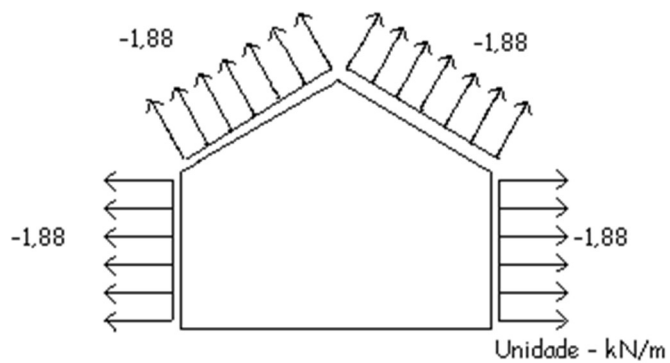
Fonte: VisualVentos, 2026

Na sequência, foram definidos os coeficientes de pressão externa (C_{pe}) e pressão interna (C_{pi}), parâmetros fundamentais para a determinação das forças de vento sobre a edificação. A combinação desses coeficientes permite ao programa calcular as pressões resultantes aplicadas aos diferentes elementos que compõem o pórtico. Para os modelos analisados neste trabalho, adotou-se a condição de quatro faces igualmente permeáveis para a definição do coeficiente de pressão interna, configuração considerada representativa das condições usuais de ventilação observadas em galpões industriais.

Ao final desse processo, o programa consolida os parâmetros definidos e realiza o cálculo das ações eólicas atuantes na estrutura, fornecendo quatro casos de esforços resultantes para as direções de vento de 0° e 90° . A partir das características geométricas e das condições de contorno adotadas para os modelos analisados, foram identificados três casos críticos de carregamento para cada pórtico: um associado à incidência do vento na direção de 0° e dois associados à incidência do vento na direção de 90° . A Figura 34 reúne os três casos de carregamento de vento identificados como mais desfavoráveis para o Modelo 1 (Pórtico 6-15). A Figura 33(a) apresenta o caso crítico referente à incidência do vento na direção de 0° , enquanto as Figuras 33(b) e 33(c) representam os dois casos críticos obtidos para a direção de 90° . Esses carregamentos foram posteriormente considerados nas combinações de ações utilizadas nas análises estruturais.

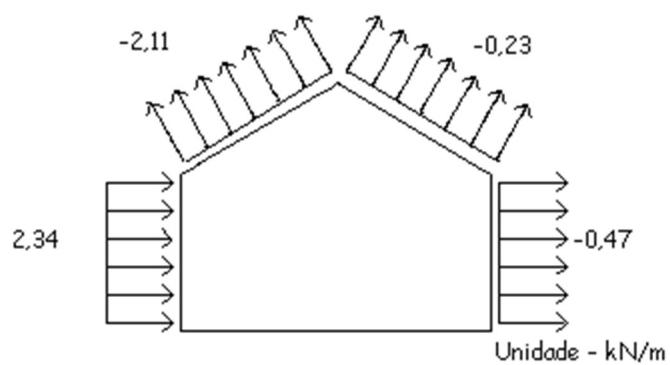
Figura 33 - Casos críticos de carregamento associado ao vento para o Modelo 1 (Pórtico 6-15)

a) Vento crítico na direção 0° (V1)



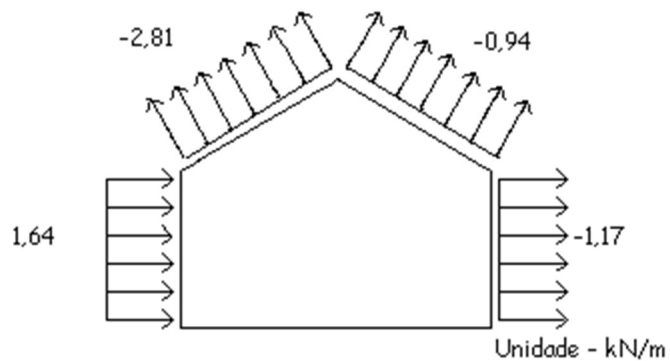
Fonte: VisualVentos, 2026

b) Primeiro vento crítico na direção 90° (V2)



Fonte: VisualVentos, 2026

c) Segundo vento crítico na direção 90° (V3)



Fonte: VisualVentos, 2026

Para os demais modelos de pórtico analisados, o procedimento adotado foi análogo ao apresentado para o Modelo 1 – Pórtico 6-15, diferindo apenas nos parâmetros geométricos específicos de cada configuração. Em razão da similaridade metodológica entre os casos estudados, optou-se por apresentar detalhadamente apenas um dos modelos no corpo principal do trabalho.

4.1.3 Combinações de Ações

Após a definição dos carregamentos permanente, da sobrecarga de utilização e do vento, procedeu-se à elaboração das combinações de ações empregadas nas análises estruturais. Para tanto, foram adotados os critérios estabelecidos pelas ABNT NBR 6120:2019 — *Ações para o cálculo de estruturas de edificações* e ABNT NBR 8800:2024 — *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações*.

As combinações de ações têm como objetivo representar as diferentes possibilidades de atuação simultânea dos carregamentos ao longo da vida útil da estrutura, permitindo a avaliação de seu comportamento tanto em condições de serviço quanto em situações de resistência última.

Para as verificações do ELS, foram adotadas as quatro combinações raras previstas pelas normas de referência, uma vez que estas representam as condições mais relevantes para a avaliação dos deslocamentos e demais critérios de utilização da estrutura. A definição por combinações raras se dá pela ABNT NBR 8800:2024, norma prioritária para as verificações de deslocamentos em estruturas metálicas. Já para as verificações do ELU, foram consideradas dez combinações normais de ações utilizadas no dimensionamento, contemplando as diferentes possibilidades de predominância da sobrecarga de utilização e da ação do vento.

As combinações de ações adotadas neste trabalho são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, correspondentes, respectivamente, às verificações de ELS e ELU.

Tabela 1 - Combinações para o Estado Limite de Serviço

Combinações Raras	
ELS1	(PP + CP) + SC
ELS2	(PP + CP) + V1
ELS3	(PP + CP) + V2
ELS4	(PP + CP) + V3

Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 2 - Combinações para o Estado Limite Último

Combinações Normais	
ELU1	$1,25 (PP + CP) + 1,5 SC$
ELU2	$1,0 (PP + CP) + 1,4 V1$
ELU3	$1,0 (PP + CP) + 1,4 V2$
ELU4	$1,0 (PP + CP) + 1,4 V3$
ELU5	$1,25 (PP + CP) + 1,4 V1 + 1,2 SC$
ELU6	$1,25 (PP + CP) + 1,4 V2 + 1,2 SC$
ELU7	$1,25 (PP + CP) + 1,4 V3 + 1,2 SC$
ELU8	$1,25 (PP + CP) + 0,84 V1 + 1,5 SC$
ELU9	$1,25 (PP + CP) + 0,84 V2 + 1,5 SC$
ELU10	$1,25 (PP + CP) + 0,84 V3 + 1,5 SC$

Fonte: Autoria própria, 2026

As combinações apresentadas foram implementadas nos programas de cálculo para a obtenção dos esforços solicitantes e deslocamentos utilizados nas etapas subsequentes de dimensionamento, verificação estrutural e comparação de resultados.

4.2 PÓRTICOS EM PERFIS DE ALMA CHEIA

4.2.1 Pré-Dimensionamento

As dimensões iniciais dos perfis foram definidas por meio de critérios usuais de pré-dimensionamento encontrados na literatura técnica de estruturas em aço, como Bellei (2024) e Pfeil (2009). Tais relações têm como objetivo fornecer uma estimativa inicial das seções a serem analisadas, servindo como ponto de partida para o processo iterativo de dimensionamento e verificação normativa.

As relações utilizadas são as detalhadas pelas Equações 3, 4 e 5, que estimam a altura do perfil (d) e o raio de giração para os pilares e vigas que compõem os pórticos. Nos perfis I convencionais, o raio de giração em torno do eixo principal (r_x) é normalmente superior ao raio de giração em torno do eixo secundário (r_y), com a tendência de flambagem ocorrendo em relação ao eixo de menor rigidez. Dessa forma, o eixo y geralmente representa a condição crítica para elementos comprimidos, motivo pelo qual o raio de giração r_y é mais utilizado para os critérios de pré-dimensionamento. Para a estimativa deste valor, considerou-se o índice de esbeltez – que relaciona comprimento destravado e raio de giração – de 200, limite estabelecido pela ABNT NBR 8800:2024 para barras comprimidas.

$$\frac{V_{\text{vão}}}{70} \leq d_{\text{VIGA}} \leq \frac{V_{\text{vão}}}{50} \quad (3)$$

$$\frac{H_{\text{PILAR}}}{30} \leq d_{\text{PILAR}} \leq \frac{H_{\text{PILAR}}}{20} \quad (4)$$

$$r_y \geq \frac{L_y}{200} \quad (5)$$

Além dos critérios anteriormente apresentados, adotou-se no pré-dimensionamento a condição $b_{f,\text{PILAR}} \geq b_{f,\text{VIGA}}$. Essa premissa foi estabelecida com o objetivo de favorecer a compatibilização geométrica entre os elementos estruturais, facilitando o detalhamento e a execução das ligações viga-pilar.

Com base nestes parâmetros e condições definidas, os perfis pré-dimensionados para cada modelo de pórtico em perfis de aço em alma cheia estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Perfis pré-dimensionados em alma cheia

Pré-Dimensionamento		
Modelo 1	Vigas	VS 300X23
	Pilares	VS 300X25
Modelo 2	Vigas	VS 300X25
	Pilares	VS 400X39
Modelo 3	Vigas	VS 500X61
	Pilares	VS 450X59
Modelo 4	Vigas	VS 300X23
	Pilares	VS 400X28
Modelo 5	Vigas	VS 400X28
	Pilares	VS 400X28
Modelo 6	Vigas	VS 500X61
	Pilares	VS 450X59

Fonte: Autoria própria, 2026

4.2.2 Verificação do ELS

As verificações do Estado Limite de Serviço (ELS) têm por objetivo garantir o desempenho adequado da estrutura durante sua utilização, assegurando condições satisfatórias de funcionalidade, conforto e aparência. Estas análises avaliam o comportamento da estrutura sob condições normais de uso, limitando deformações e deslocamentos excessivos que possam comprometer seu funcionamento.

No caso dos pórticos analisados neste trabalho, as verificações do ELS foram realizadas por meio da análise, via programa SAP2000, dos deslocamentos máximos da estrutura, considerando-se tanto os deslocamentos verticais das vigas no ponto central do vão, quanto os deslocamentos horizontais no topo dos pilares. Esses parâmetros foram avaliados a partir das combinações raras de ações definidas anteriormente, sendo comparados aos limites estabelecidos pelas recomendações normativas.

A ABNT NBR 8800:2024 é quem define os limites máximos de deslocamentos para a verificação do ELS, como ilustra a Tabela 4, retirada do anexo B da norma.

Tabela 4 - Deslocamentos máximos estabelecidos por norma

Descrição	δ^a
Travessas de fechamento	$L/250^b$
Terças de cobertura ^d	$L/250^c$
Vigas de cobertura ^d	$L/250$
Vigas de piso	$L/350^e$
Vigas que suportam pilares	$L/500^e$
Pilares de fechamento em relação a base	$H/250$
Pilares de fechamento entre os apoios	$L/250$
Vigas de rolamento (para pontes rolantes classificadas conforme o regime de trabalho) ^j : — Deslocamento vertical: — Leve ou de uso eventual e moderado — Pesado — Severo — Deslocamento horizontal — Todos os regimes de trabalho, exceto o severo — Severo	$L/750^f$ $L/1000^f$ $L/1250^f$ $L/500$ $L/750$
Galpões em geral e edificações de um pavimento: — Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base — Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H/300$ $H/500^{g, h}$
Edificações de dois ou mais pavimentos: — Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base — Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$H/400$ $h/500^i$

Fonte: Adaptado de Tabela B.1 da ABNT NBR 8800, 2024

Seguindo os critérios de aceitabilidade dos deslocamentos definidos pela ABNT NBR 8800:2024, foi adotado o limite de deslocamento vertical igual a $(L/250)$, sendo (L) o vão da viga. Para os pilares, considerou-se o limite de deslocamento horizontal do topo em relação à base igual a $(H/300)$, sendo (H) a altura do pilar.

A Tabela 5 reúne os resultados dos deslocamentos calculados para os diferentes modelos de pórtico estudados. Observa-se que, na maioria dos casos, os perfis obtidos no pré-dimensionamento inicial (Tabela 3) mostraram-se insuficientes para atender aos limites de flecha adotados, demandando ajustes nas seções selecionadas até que os requisitos de serviço fossem plenamente satisfeitos. Os perfis resultantes dessas adequações não são apresentados neste momento, uma vez que ainda foram submetidos às verificações do Estado Limite Último (ELU). Dessa forma, a apresentação das seções finais adotadas em cada modelo será realizada após a conclusão de todas as etapas de dimensionamento e validação estrutural.

Tabela 5 - Verificação das flechas verticais e horizontais

ESTADO LIMITE DE SERVIÇO					
MODELO 1					
Deslocamento Vertical			Deslocamento Horizontal		
Comb. Crítica	Δy	Limite	Comb. Crítica	Δx	Limite
ELS1	5,74cm	$L/250 = 6\text{cm}$	ELS4	0,99cm	$H/300 = 2\text{cm}$
MODELO 2					
Deslocamento Vertical			Deslocamento Horizontal		
Comb. Crítica	Δy	Limite	Comb. Crítica	Δx	Limite
ELS1	9,90cm	$L/250 = 10\text{cm}$	ELS1	1,69cm	$H/300 = 2\text{cm}$
MODELO 3					
Deslocamento Vertical			Deslocamento Horizontal		
Comb. Crítica	Δy	Limite	Comb. Crítica	Δx	Limite
ELS1	11,8cm	$L/250 = 14\text{cm}$	ELS4	1,94cm	$H/300 = 2\text{cm}$
MODELO 4					
Deslocamento Vertical			Deslocamento Horizontal		
Comb. Crítica	Δy	Limite	Comb. Crítica	Δx	Limite
ELS1	3,6cm	$L/250 = 6\text{cm}$	ELS4	3,3cm	$H/300 = 3,3\text{cm}$
MODELO 5					
Deslocamento Vertical			Deslocamento Horizontal		
Comb. Crítica	Δy	Limite	Comb. Crítica	Δx	Limite
ELS1	9,7cm	$L/250 = 10\text{cm}$	ELS1	1,7cm	$H/300 = 3,3\text{cm}$
MODELO 6					
Deslocamento Vertical			Deslocamento Horizontal		
Comb. Crítica	Δy	Limite	Comb. Crítica	Δx	Limite
ELS1	13,2cm	$L/250 = 14\text{cm}$	ELS1	2,2cm	$H/300 = 3,3\text{cm}$

Fonte: Autoria própria, 2026

4.2.3 Dimensionamento do ELU

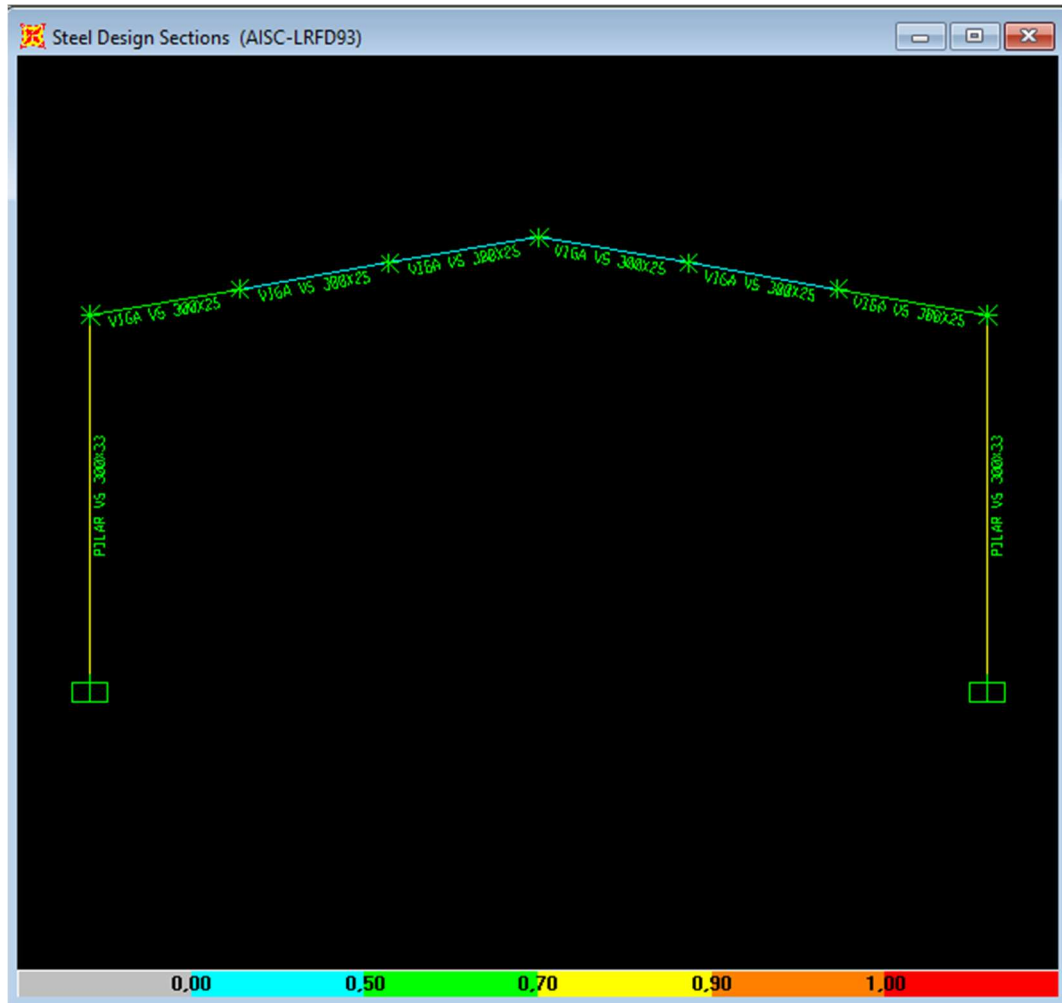
As verificações do Estado Limite Último têm como finalidade garantir a segurança estrutural, assegurando que os elementos resistam adequadamente aos esforços solicitantes mais desfavoráveis sem atingir condições de colapso ou perda de estabilidade.

Neste trabalho, as verificações do ELU dos pórticos compostos por perfis de alma cheia foram realizadas com o auxílio do programa SAP2000. A partir das combinações normais de ações definidas anteriormente, o programa foi utilizado para determinar os esforços solicitantes atuantes nos elementos estruturais e realizar as verificações de resistência conforme os critérios normativos da ABNT NBR 8800:2024. As análises foram conduzidas considerando a atuação simultânea dos esforços e suas respectivas interações.

Dessa forma, os perfis previamente ajustados para atendimento aos critérios do ELS foram submetidos às verificações do ELU, permitindo a definição das seções finais adotadas para cada modelo analisado. As análises contemplaram tanto os critérios de resistência quanto os de estabilidade previstos pela norma e relacionados aos principais modos de falha apresentados na revisão bibliográfica.

Cabe destacar que o processo de dimensionamento não teve como objetivo apenas a obtenção de perfis que atendessem aos requisitos normativos, mas também a seleção das seções mais eficientes para cada elemento estrutural. Para isso, foram avaliadas diferentes alternativas de perfis, buscando-se minimizar o consumo de aço sem comprometer o atendimento aos critérios de resistência, estabilidade e deslocamentos estabelecidos pelas verificações. Esse procedimento permitiu a definição de soluções otimizadas para cada pórtico, fornecendo uma base consistente para as comparações realizadas posteriormente com as alternativas em perfis celulares. A Figura 34 ilustra a verificação estrutural do Modelo 1 (Pórtico 6-15), demonstrando a aprovação dos elementos após a seleção das seções mais eficientes dentre as alternativas analisadas. Os perfis adotados foram aqueles que atenderam aos critérios de resistência e estabilidade, com o menor consumo de material possível.

Figura 34 - Verificação estrutural do Modelo 1 (Pórtico 6-15)



Fonte: SAP2000, 2026

A Tabela 6 resume os perfis aprovados na verificação estrutural final do ELU, constituindo a base que será utilizada para as comparações posteriores.

Tabela 6 - Perfis aprovados após a verificação do ELU

ESTADO LIMITE ÚLTIMO				
Modelo	Pilares		Vigas	
	Perfil aprovado	Peso Linear (kg/m)	Perfil aprovado	Peso Linear (kg/m)
Pórtico 6-15	VS 300x33	33,2	VS 300x25	24,6
Pórtico 6-25	VS 450x59	58,6	VS 400x37	36,9
Pórtico 6-35	VS 500x73	72,5	VS 500x61	61,1
Pórtico 10-15	VS 400x44	44,0	VS 300x31	31,3
Pórtico 10-25	VS 400x44	44,0	VS 450x51	51,2
Pórtico 10-35	VS 550x75	75,0	VS 550x64	63,6

Fonte: Autoria própria, 2026

4.3 PÓRTICOS EM PERFIS CELULARES

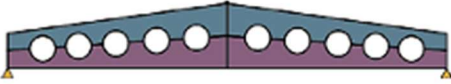
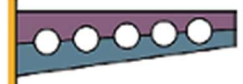
4.3.1 Considerações Iniciais

Conforme apresentado anteriormente, o dimensionamento dos perfis celulares foi realizado com o auxílio do programa VCA+, desenvolvido pela ArcelorMittal Brasil para a verificação de vigas com aberturas. Apesar de também constituir base normativa importante para os procedimentos de dimensionamento guiados pelo programa, a ABNT NBR 8800:2024 não contempla de forma explícita os fenômenos particulares associados aos perfis com aberturas na alma. Em função disso, os procedimentos de cálculo e verificação empregados pelo programa, assim como os adotados neste trabalho, fundamentam-se em recomendações da literatura especializada e em metodologias aproximadas, capazes de contemplar os diferentes modos de falha associados às vigas celulares.

Além do caráter comparativo entre as soluções em alma cheia e celulares, um dos objetivos desta pesquisa consiste em avaliar o programa VCA+, recentemente disponibilizado em sua primeira versão, buscando compreender suas funcionalidades, aplicações e limitações. Dessa forma, parte significativa dos procedimentos adotados baseou-se nas recomendações do Manual de Vigas Celulares da ArcelorMittal Brasil, elaborado pelos professores Gustavo Veríssimo e Felipe Sakiyama, tendo em vista sua abrangência e o detalhamento dos critérios geométricos, construtivos e estruturais relacionados a essa tipologia de perfil.

O VCA+ tem como escopo o dimensionamento de vigas celulares e de vigas com outras aberturas especiais na alma, contemplando os principais modos de falha associados a essas tipologias, bem como as verificações do Estado Limite de Serviço (ELS), relacionadas a deformações excessivas e vibrações. A Figura 35 apresenta as diferentes configurações abrangidas pelo programa, incluindo vigas de aço isoladas e mistas, de eixo reto ou curvo, com altura constante ou variável, além de sistemas biapoiados e em balanço. No contexto desta pesquisa, foram consideradas exclusivamente vigas de eixo reto e altura constante.

Figura 35 - Tipos de vigas celulares abrangidas pelo escopo do programa 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

Fonte: ArcelorMittal, 2025

Embora o programa seja bastante completo quanto às tipologias de vigas no escopo de análise, sua utilização em sistemas mais complexos, como os aporticados, requer adaptações e uma compreensão adequada dos critérios adotados pelo programa. Tais adequações visam aproximar as condições de contorno e os esforços atuantes do comportamento real da estrutura, sendo detalhadas nos tópicos subsequentes.

Em relação aos catálogos de perfis integrados ao programa, cita-se os de perfis VS, CS, CVS e VCS, desenvolvidos pela ArcelorMittal. O catálogo VCS contempla perfis com proporções geométricas otimizadas para a utilização como vigas celulares. As relações entre altura da seção original, dimensões das aberturas e largura das mesas, favorecem o desempenho estrutural frente aos diversos modos de falha característicos dessa tipologia.

Dessa forma, optou-se por utilizar o catálogo de Vigas Celulares Soldadas como base para o dimensionamento realizado neste trabalho. Sua utilização visa proporcionar seções previamente otimizadas, que reduzam a necessidade de ajustes geométricos adicionais que seriam necessários caso fossem empregados perfis soldados convencionais (VS). Com isso, buscou-se obter soluções estruturalmente mais eficientes e compatíveis com os critérios de dimensionamento adotados pelo programa e pela literatura especializada.

4.3.2 Pré-Dimensionamento

O processo de pré-dimensionamento das vigas celulares adotado neste trabalho baseou-se nas recomendações presentes no Manual de Vigas Celulares (2025) da ArcelorMittal Brasil e em outras referências da literatura especializada, com destaque para Oliveira (2012). Entretanto, algumas adaptações foram necessárias para compatibilizar as metodologias disponíveis com a tipologia estrutural estudada.

As recomendações encontradas na literatura para a definição inicial da altura do perfil celular (H_t) são predominantemente voltadas para sistemas de piso, nos quais se sugere a relação ($H_t = V\tilde{a}o/17$). Embora adequada para esse tipo de aplicação, tal relação mostrou-se pouco representativa para os pórticos de cobertura considerados neste trabalho. Dessa forma, foram necessárias adequações no procedimento de pré-dimensionamento, tomando como base critérios análogos aos empregados em vigas de alma cheia para sistemas de cobertura.

Bellei (2024) define a relação de pré-dimensionamento $V\tilde{a}o/70$ a $V\tilde{a}o/50$ para vigas em alma cheia aplicadas em sistemas de cobertura. Outras literaturas como Salmon, Johnson e Malhas (2009) definem para vigas de aço utilizadas em sistemas de piso a relação $V\tilde{a}o/20$ a $V\tilde{a}o/18$. Em função disso, realizou-se uma aproximação matemática que definiu para vigas celulares a serem aplicadas em sistemas de cobertura a relação $V\tilde{a}o/45$. Como os pilares dos pórticos foram dimensionados pelo programa a partir de modelos estruturais de vigas adaptadas, seu pré-dimensionamento seguiu o mesmo processo adotado para as vigas.

Além da relação entre vão e altura do perfil final, outras considerações para o processo de pré-dimensionamento foram:

- Taxa de expansão (k) de 1,5, considerado valor ótimo pela literatura especializada. Esta taxa indica que a seção final expandida alcançará altura 50% maior do que a altura do perfil de origem;
- Largura da mesa dos pilares igual ou superior à largura da mesa das vigas, visando praticidade executiva;
- Espessura mínima da alma, definida para cada caso a partir da Equação 6, retirada do Manual de Vigas Celulares da ArcelorMittal:

$$t_w \geq \frac{H_t}{3,94\sqrt{E/f_y}} \quad (6)$$

Onde:

t_w é a espessura da alma;

H_t é a altura expandida do perfil celular;

E é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço.

Para fins de ilustração do procedimento adotado, o processo de pré-dimensionamento foi detalhado para um modelo representativo. Posteriormente, foi elaborada a Tabela 7 que apresenta um resumo dos perfis pré-dimensionados correspondentes a cada um dos pórticos analisados.

Optou-se por detalhar o processo de pré-dimensionamento do Modelo 2 (Pórtico 6-25). A escolha desse modelo se justifica pelo fato de que, para o Modelo 1, as relações de pré-dimensionamento conduzem a um perfil original de altura inferior às menores seções disponíveis no catálogo VCS. Dessa forma, a seleção da seção inicial para esse caso resultaria em uma configuração necessariamente superior à estimativa teórica, conduzindo a um pré-dimensionamento superestimado e menos representativo do procedimento geral adotado no trabalho.

No Modelo 2 tem-se o pórtico com 25m de vão e pilares de 6m de altura. Com isso, o pré-dimensionamento foi conduzido conforme as Equações 7 a 12.

- Vigas

$$H_t \geq \frac{25000}{45} = 555,56\text{mm} \quad (7)$$

$$d \geq \frac{555,56}{1,5} = 370,37\text{mm} \quad (8)$$

$$t_w \geq \frac{555,56}{3,94\sqrt{\frac{20000}{34,5}}} = 5,86\text{mm} \quad (9)$$

A partir dos valores encontrados, adotou-se como ponto de partida para o dimensionamento, o perfil VCS 400x36,6.

- Pilares

$$H_t \geq \frac{6000}{45} = 133,33\text{mm} \quad (10)$$

$$d \geq \frac{133,33}{1,5} = 88,89\text{mm} \quad (11)$$

$$t_w \geq \frac{133,33}{3,94 \sqrt{\frac{20000}{34,5}}} = 1,41\text{mm} \quad (12)$$

Verificou-se que o perfil inicialmente obtido para os pilares do Modelo 2 apresenta altura inferior à mínima disponível no catálogo da VCS, que possui seções com alturas que variam entre 300 e 1000mm. Dessa forma, foi necessária a adoção de uma seção compatível com as limitações comerciais do catálogo, optando-se por um perfil com largura de mesa (b_f) mínima suficiente para garantir a viabilidade de montagem, neste caso 140mm. Diante disso, o perfil pré-dimensionado foi o VCS 300x28,3.

A Tabela 7 apresenta o resumo dos perfis pré-dimensionados para cada modelo de pórtico do trabalho, obtidos através do processo anteriormente detalhado.

Tabela 7 - Perfis celulares pré-dimensionados para os 6 modelos

Pré-Dimensionamento		
Modelo 1	Vigas	VCS 300X22,6
	Pilares	VCS 300X22,6
Modelo 2	Vigas	VCS 400X36,6
	Pilares	VCS 300X28,3
Modelo 3	Vigas	VCS 550X63,2
	Pilares	VCS 450X45,9
Modelo 4	Vigas	VCS 300X22,6
	Pilares	VCS 300X22,6
Modelo 5	Vigas	VCS 400X36,6
	Pilares	VCS 300X28,2
Modelo 6	Vigas	VCS 550X63,2
	Pilares	VCS 450X45,9

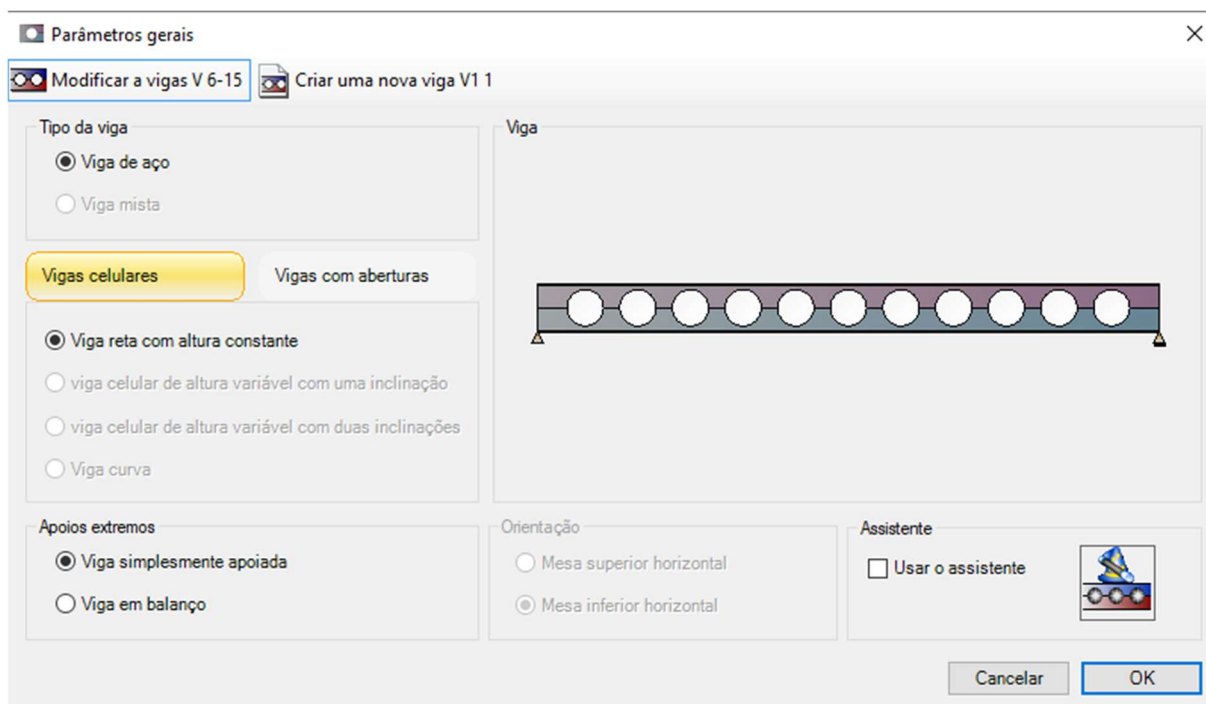
Fonte: Autoria própria, 2026

4.3.3 Definições Geométricas

A definição da geometria das vigas celulares no programa VCA+ é realizada por meio de três etapas principais, correspondentes às telas **Parâmetros gerais**, **Vão e posição da viga**, **Seção transversal** e **Cortes da viga**. Em conjunto, essas interfaces permitem a caracterização completa da geometria do elemento, desde a definição das dimensões gerais e das condições de apoio até a especificação da seção transversal e da configuração das aberturas na alma. Na sequência são apresentados os principais parâmetros inseridos em cada uma dessas etapas, bem como os critérios adotados para sua definição no contexto deste trabalho.

Na aba de **Parâmetros gerais**, pode-se definir o tipo de viga a ser verificada, ou seja, sua configuração quanto à tipologia (viga de aço ou mista), formas de abertura na alma, geometria longitudinal e condições de apoio. A Figura 36 ilustra a interface da tela com a definição das características adotadas para a viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15).

Figura 36 - Parâmetros gerais da viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15)



Fonte: VCA+, 2026

A tela de **Vão e posição da viga**, representada pela Figura 37, traz os campos de inserção dos dados de comprimento (Vão Horizontal) do perfil e dos espaçamentos entre os pórticos. Para esta pesquisa foi definido que todos os pórticos seriam analisados na configuração de

intermediário, com a distância de 6m entre as estruturas, como mostra os dados inseridos no programa.

Figura 37 - Tela de vão e posição da viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15)

Vão e posição da viga

Geometria da viga

Vão horizontal da viga m

Tipo de viga

☒ Viga intermediária

☐ Viga de borda

Espaçamentos

Do lado esquerdo

L1 = m

Do lado direito

L2 = m

Larguras disponíveis para o cálculo de cargas distribuídas - Consulte a Ajuda para obter mais informações (Tecla F1)

Cancelar OK

Fonte: VCA+, 2026

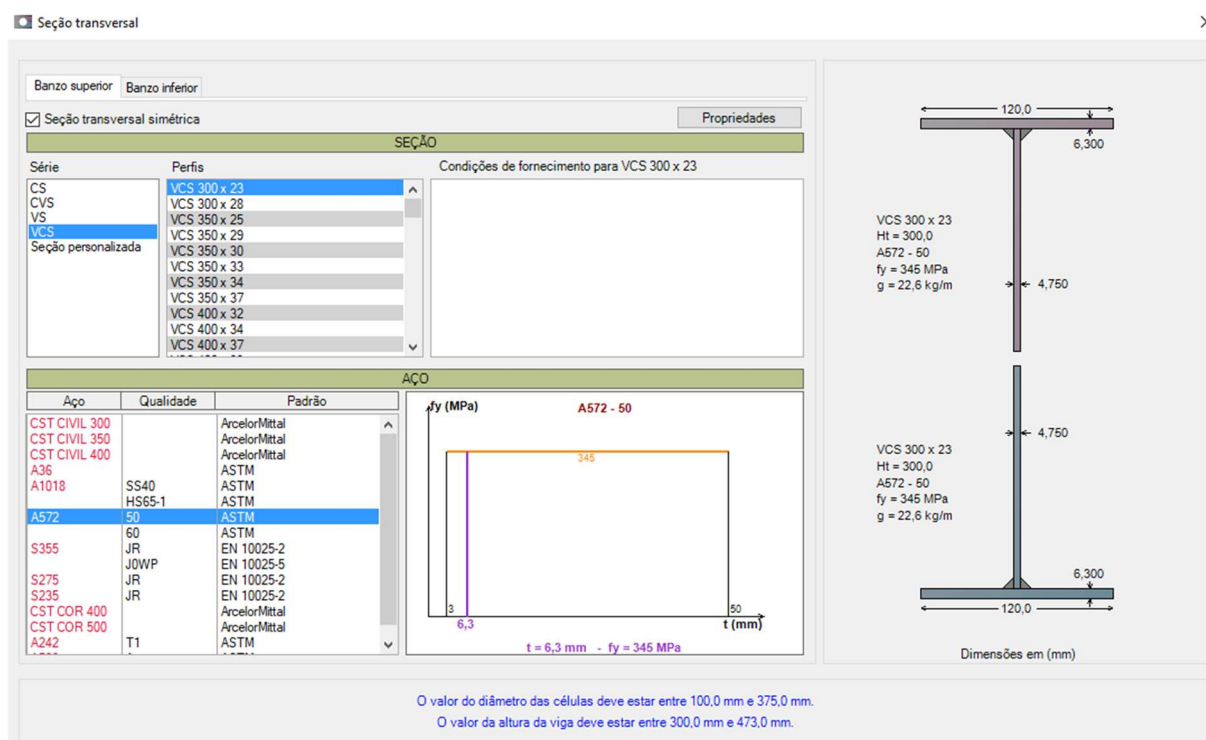
A tela seguinte, ilustrada pela Figura 38, é a que trata da definição da **Seção transversal** aplicada ao perfil de origem da viga celular a ser verificada. É possível adotar seções nos catálogos de perfis CS, CVS, VS e VCS fornecidos pela ArcelorMittal, ou então adotar uma seção personalizada. Além disso, define-se a simetria do perfil, sendo possível adotar seções diferentes para os banzos superior e inferior ou optar pela mesma seção para ambos. Determina-se, ainda, o material de composição dos perfis, a partir de uma tabela composta por diversos tipos de aço.

Como definido anteriormente, para os pórticos do trabalho foram adotados perfis VCS, otimizados para aplicação em vigas celulares. Além disso, ficou definido a simetria de seções para todos os pórticos e o aço ASTM A572 Gr. 50 como material de composição, com Tensão de Escoamento (f_y) definida em 345 Mpa e Tensão Última (f_u) de 450 MPa.

Por fim, na parte inferior da tela, o programa apresenta automaticamente os limites admissíveis para o diâmetro das aberturas e para a altura expandida da viga, definidos em

função da seção originalmente selecionada. Essas restrições decorrem dos critérios geométricos e de estabilidade adotados pelo VCA+, sendo mais restritivas para perfis com pequenas espessuras de alma (t_w), como aqueles com espessura de 4,75 mm. Nesses casos, expansões excessivas podem resultar em montantes de alma demasiadamente esbeltos e em seções líquidas reduzidas ao redor das aberturas, comprometendo a resistência ao cisalhamento horizontal e aumentando a suscetibilidade à flambagem dos montantes. Além disso, essas limitações influenciam diretamente a definição do espaçamento entre aberturas e de seus respectivos diâmetros, reduzindo o número de configurações de corte viáveis e, consequentemente, restringindo a obtenção de soluções ainda mais eficientes.

Figura 38 - Tela de definição da seção transversal para a viga do Modelo 1 (Pórtico 6-15)



Fonte: VCA+, 2026

Os últimos parâmetros geométricos definidos correspondem à configuração de corte do perfil celular. Para isso, fixou-se a altura total do perfil expandido (H_t), adotando-se uma taxa de expansão igual a 1,5, conforme mencionado. Em seguida, o programa gera automaticamente diferentes combinações de diâmetro, espaçamento e número de aberturas, fornecendo as alternativas geométricas possíveis para a seção analisada.

A seleção da configuração de corte mais adequada foi realizada com base nas recomendações de Oliveira (2012) para vigas celulares de cobertura, apresentadas na Tabela 8.

Para vigas com taxa de expansão igual a 1,5, a autora recomenda que a relação entre o diâmetro das aberturas e a altura original do perfil (a_0/d) permaneça entre 1,1 e 1,3, assim como a relação entre o espaçamento das aberturas e seu diâmetro (e/a_0). O atendimento a esses intervalos contribui para a obtenção de configurações geometricamente equilibradas e estruturalmente mais eficientes.

Tabela 8 - Relações parametrizadas para otimização do corte para perfis celulares

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

Fonte: Oliveira, 2012

A Figura 39 apresenta a tela de definição dos critérios de corte do software VCA+, responsável pela configuração dos parâmetros geométricos que determinam a disposição das aberturas na alma do perfil.

Figura 39 - Tela de definição dos parâmetros de corte dos perfis

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 $a_0 = 333,33$ mm

☐ Espaçamento das células
Espaçamento $e = 383,33$ mm
Largura do montante $w = 50,000$ mm
Razão $e / a_0 = 1,150$

☒ Altura total: 450,00 mm

Buscar as soluções
Número de soluções: 22

n°	a_0 (mm)	w (mm)	e (mm)	e / a_0	n	Ht (mm)	m (kg)
1	333,3	50,0	383,3	1,15	39	450,0	296
2	343,8	55,0	398,8	1,16	37	450,0	295
3	323,5	55,0	378,5	1,17	39	450,0	303
4	333,3	60,0	393,3	1,18	38	450,0	299
5	342,1	65,0	407,1	1,19	36	450,0	299
6	325,0	65,0	390,0	1,20	38	450,0	305
7	333,3	70,0	403,3	1,21	37	450,0	302
8	340,9	75,0	415,9	1,22	36	450,0	300
9	326,1	75,0	401,1	1,23	37	450,0	307
10	333,3	80,0	413,3	1,24	36	450,0	306
11	340,0	85,0	425,0	1,25	35	450,0	304
12	346,2	90,0	436,2	1,26	34	450,0	303
13	333,3	90,0	423,3	1,27	35	450,0	309
14	339,3	95,0	434,3	1,28	34	450,0	308
15	344,8	100,0	444,8	1,29	33	450,0	308
16	333,3	100,0	433,3	1,30	34	450,0	312
17	338,7	105,0	443,7	1,31	33	450,0	312
18	343,8	110,0	453,8	1,32	33	450,0	308
19	338,2	115,0	453,2	1,34	33	450,0	312

Perfil base para ambos os banzos: VCS 300 x 23

Fonte: VCA+, 2026

4.3.4 Dimensionamento do ELU

4.3.4.1 Carregamento

Para a definição dos carregamentos considerados no dimensionamento das vigas celulares, adotou-se uma estratégia que garantisse a compatibilidade entre as análises realizadas no SAP2000 e no VCA+. Inicialmente, foram identificadas, para cada elemento estrutural, as combinações de ações que produziram as solicitações mais críticas durante as verificações do Estado Limite Último dos pórticos compostos por perfis de alma cheia. A Figura 40 apresenta um exemplo da identificação dessas combinações no SAP2000, neste caso para o Pórtico 6-15, com a combinação ELU1 se mostrando a mais crítica, ou seja, provocando a maior taxa de aproveitamento do perfil (0,671).

Figura 40 - Tela de informações da análise estrutural para vigas do Pórtico AC 6-15

Steel Stress Check Information (AISC-LRFD93)

Frame ID: 3 Analysis Section: VIGA VS 300X25
 Design Code: AISC-LRFD93 Design Section: VIGA VS 300X25

COMBO ID	STATION LOC	----MOMENT INTERACTION CHECK-----	MAJ-SHR	MIN-SHR
		RATIO = AXL + B-MAJ + B-MIN	RATIO	RATIO
ELU1	0,00	0,671 (C) = 0,018 + 0,653 + 0,000	0,098	0,000
ELU1	126,86	0,331 (C) = 0,017 + 0,314 + 0,000	0,080	0,000
ELU1	253,73	0,060 (C) = 0,016 + 0,044 + 0,000	0,062	0,000
ELU2	0,00	0,215 (T) = 0,006 + 0,209 + 0,000	0,033	0,000
ELU2	126,86	0,103 (T) = 0,007 + 0,096 + 0,000	0,026	0,000
ELU2	253,73	0,017 (T) = 0,007 + 0,010 + 0,000	0,019	0,000
ELU3	0,00	0,172 (C) = 0,000 + 0,171 + 0,000	0,036	0,000

Modify/Show Overwrites: Overwrites
 Display Details for Selected Item: Details
 Display Complete Details: Tabular Data

Strength ☒ Deflection ☐ OK Cancel

Stylesheet: Default Table Format File

Fonte: SAP2000, 2026

Uma vez definida a combinação crítica para cada elemento, os carregamentos correspondentes foram inseridos diretamente no VCA+. Ressalta-se que o peso próprio da viga não precisou ser incluído manualmente, uma vez que o VCA+ o considera automaticamente a partir das propriedades geométricas e do material da seção selecionada. Os coeficientes parciais de ponderação e de combinação das ações foram informados manualmente na interface do

programa, conforme a combinação previamente identificada no SAP2000, permitindo reproduzir no dimensionamento das vigas celulares as mesmas condições de carregamento adotadas para os perfis de alma cheia.

4.3.4.2 Adaptações do Modelo Estrutural

Conforme discutido anteriormente, o programa VCA+ foi desenvolvido para o dimensionamento de vigas isoladas, não contemplando diretamente o comportamento de sistemas estruturais aporticados. Em função dessa limitação, foram necessárias adaptações metodológicas para que as verificações realizadas no programa reproduzissem, de forma representativa, as condições de solicitação dos elementos pertencentes aos pórticos analisados. As adaptações adotadas diferiram para vigas e pilares, em razão das particularidades de carregamento e das condições de contorno de cada elemento.

No caso das vigas, a necessidade de adaptação do modelo estrutural decorre não apenas da interação com os pilares, mas também da própria configuração geométrica dos pórticos analisados. Enquanto o VCA+ foi desenvolvido para a análise de vigas isoladas de eixo reto, as vigas de cobertura dos pórticos são constituídas por dois trechos inclinados, unidos na região da cumeeira, formando um único elemento estrutural. Dessa forma, foi necessário adotar um modelo estrutural equivalente no programa, capaz de reproduzir simultaneamente a geometria da cobertura e o comportamento estrutural da viga no contexto do pórtico.

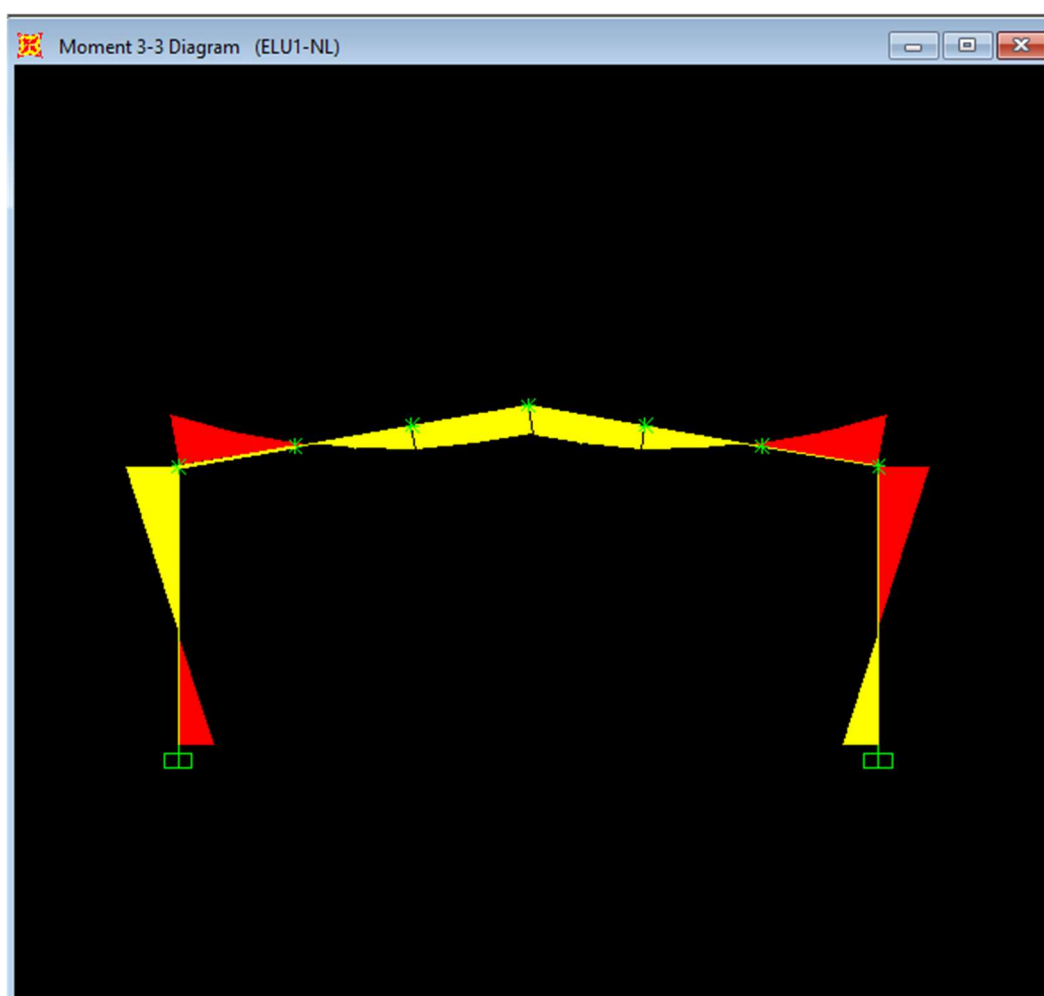
Para isso, além da adaptação geométrica, tornou-se necessário reproduzir no VCA+ as solicitações atuantes na viga conforme obtidas na análise global da estrutura. Portanto, para alcançar o modelo estrutural mais próximo da realidade, impôs-se à viga do pórtico a atuação de esforços normais e momentos fletores decorrentes da continuidade estrutural e da interação com os pilares. Assim, além dos carregamentos distribuídos definidos anteriormente, foram inseridos no programa os valores de força axial e momento fletor resultantes da combinação de ações mais crítica, obtidos a partir das análises realizadas no SAP2000.

Para os pilares, a adaptação do modelo estrutural consistiu na inserção, no VCA+, dos momentos fletores atuantes nas extremidades inferior e superior do elemento, bem como a força normal de compressão correspondente à combinação de ações mais crítica. Dessa forma, o modelo estrutural adotado no programa passou a representar de maneira equivalente as condições de solicitação dos pilares pertencentes ao sistema aporticado.

Diferentemente das vigas, para os pilares não foi considerada a aplicação direta do peso próprio e dos carregamentos permanentes distribuídos. Essa simplificação foi adotada porque tais ações atuam predominantemente na direção axial do elemento e seus efeitos já estão contemplados na força normal de compressão e nos momentos fletores extraídos da análise global do pórtico. Assim, a inserção manual desses esforços permitiu representar diretamente os efeitos estruturais da combinação crítica, sem a necessidade de reaplicação individual das ações no VCA+.

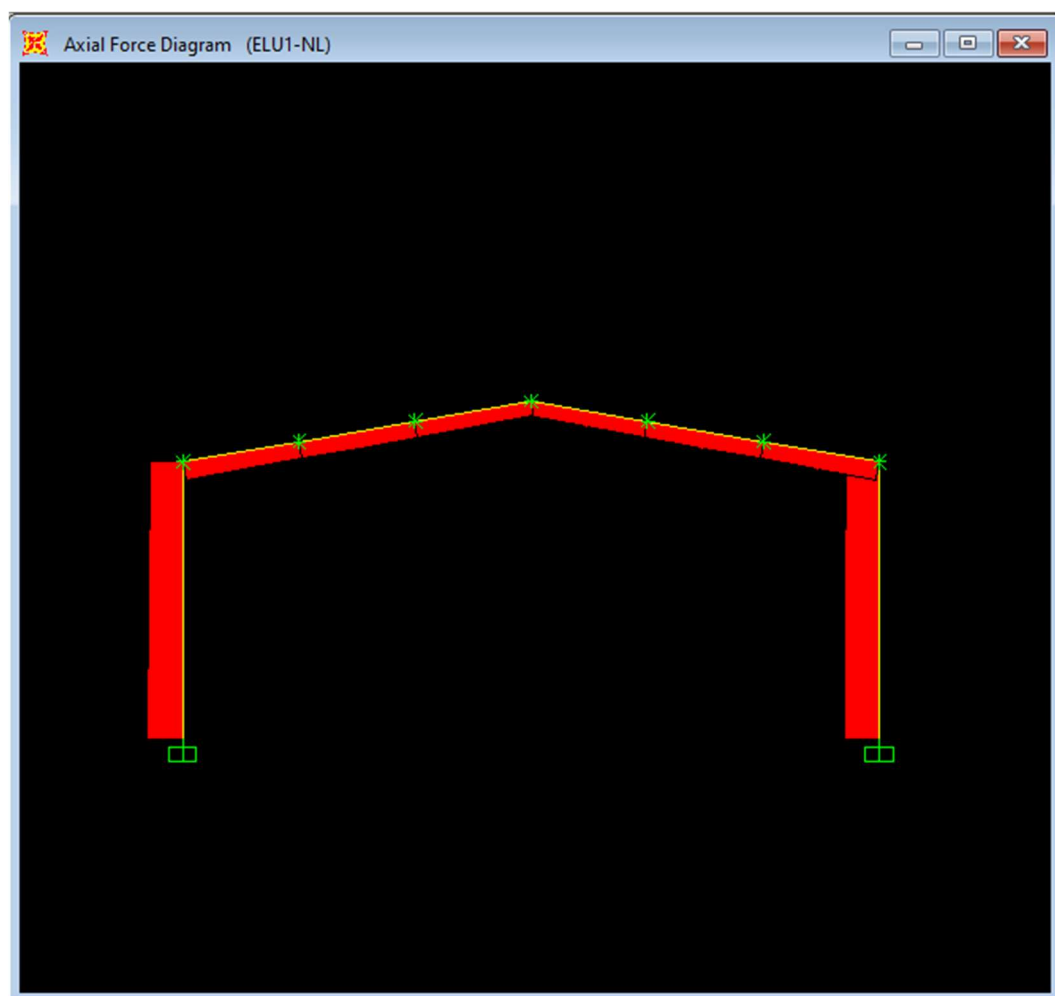
As Figuras 41 e 42 apresentam, respectivamente, os diagramas de momento fletor e esforço normal, retirados da análise da estrutura no SAP2000 e utilizados como referência. Por simplificação, representou-se os diagramas da análise do Modelo 1 (Pórtico 6-15), a partir da combinação crítica identificada para a análise do Estado Limite Último.

Figura 41 - Diagrama de Momento Fletor (Pórtico 6-15)



Fonte: SAP2000, 2026

Figura 42 - Diagrama de Esforço Normal (Pórtico 6-15)



Fonte: SAP2000, 2026

As Figuras 43 e 44 ilustram, respectivamente, os modelos estruturais equivalentes adotados no VCA+ para reproduzir as condições reais de solicitação para as vigas e para os pilares dos pórticos em perfis celulares.

Figura 43 - Modelo Estrutural Adaptado para as vigas celulares



Fonte: Autoria própria, 2026

Figura 44 - Modelo Estrutural Adaptado para os pilares celulares



Fonte: Autoria própria, 2026

Por fim, as Figuras 45 e 46 ilustram, respectivamente, a tela do programa VCA+ com a inserção dos casos de carregamento para as vigas e os pilares do Modelo 1 (Pórtico 6-15). É possível perceber que foram inseridos três casos de carregamento, sendo o primeiro (G) referente às ações permanentes, o segundo (Q1) referente à ação variável principal e o terceiro (Q2) referente aos esforços normais e de momento fletor inseridos manualmente.

Figura 45 - Tela de definição dos casos de carregamento - Vigas

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

☐ G Ações permanentes

☐ Q1 Sobrecarga 1

☒ Q2 Momento+Normal

☐ 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 -20,30 kN

Posição Eixo da viga

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 56,91 kN.m

Lado direito -56,91 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 6 m

Carga uniforme 0,0 kN/m²

Orientação Vertical

Força resultante 0 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 0 kN

Apoio direito 0 kN

Soma 0 kN

Diagrama de uma viga com 31 pontos numerados de 1 a 31. À esquerda, uma seta para baixo indica a direção da carga. Abaixo do diagrama, há ícones para: uma seta para baixo (carga), uma seta para cima (reação), um círculo com um ponto (momento), e as letras M (momento), V (corte), e N (normal).

Fonte: VCA+, 2026

Figura 46 - Tela de definição dos casos de carregamento - Pilares

Definição dos casos de carregamento

Casos de carregamento

☐ G Ações permanentes

☐ Q1 Sobrecarga

☒ Q2 M1+M2+N

☐ 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 -38,17 kN

Posição Eixo da viga

Momentos de extremidade

Lado esquerdo 56,91 kN.m

Lado direito 38,90 kN.m

Carga de superfície

Largura de influência 6 m

Carga uniforme 0,0 kN/m²

Orientação Vertical

Força resultante 0 kN

Forças verticais nos apoios

Apoio esquerdo 15,97 kN

Apoio direito -15,97 kN

Soma 0 kN

Diagrama de um pilar com 15 pontos numerados de 1 a 15. À esquerda, uma seta para a direita indica a direção da carga. À direita, uma seta para a esquerda indica a direção da carga. Abaixo do diagrama, há ícones para: uma seta para a direita (carga), uma seta para a esquerda (reação), um círculo com um ponto (momento), e as letras M (momento), V (corte), e N (normal).

Fonte: VCA+, 2026

4.3.4.3 Limitações do Programa

Apesar de o VCA+ constituir uma ferramenta robusta para o dimensionamento de vigas celulares, seu emprego neste trabalho exigiu a consideração de algumas limitações inerentes ao programa. Parte dessas limitações está relacionada ao fato de o programa ainda se encontrar em sua primeira versão de desenvolvimento, enquanto outra decorre da inexistência de normas técnicas específicas para o dimensionamento de perfis celulares. Em razão desse cenário, determinados procedimentos e verificações adotados pelo programa baseiam-se em recomendações da literatura especializada e em metodologias aproximadas, o que também influencia o escopo das funcionalidades atualmente disponíveis.

Uma das limitações observadas refere-se ao já comentado escopo de aplicação do VCA+, desenvolvido para o dimensionamento de vigas celulares isoladas. Dessa forma, o programa não contempla, de maneira direta, a análise de sistemas estruturais aporticados, exigindo a adoção das adaptações metodológicas apresentadas no tópico anterior. Por meio dessas adaptações, foi possível reproduzir, de forma equivalente, as condições geométricas e as solicitações atuantes nas vigas e nos pilares, viabilizando a utilização do programa no contexto deste trabalho.

Outra limitação identificada durante a utilização do VCA+ refere-se ao valor máximo de força normal que pode ser inserido manualmente no modelo estrutural. Para alguns dos modelos de vigas analisados, esse limite impediu a aplicação integral da força axial obtida na análise global do pórtico, impossibilitando a reprodução exata das condições de solicitação do elemento.

Com o objetivo de avaliar a influência dessa restrição nos resultados do dimensionamento, foram realizadas simulações comparativas considerando dois cenários extremos: o primeiro utilizando a máxima força axial permitida pelo programa e o segundo desconsiderando completamente a aplicação da força axial adicional. A comparação entre os resultados mostrou variações pouco significativas na taxa de utilização dos perfis e nas verificações dos modos de falha influenciados pela força normal, indicando que a limitação imposta pelo programa exerce impacto reduzido sobre o dimensionamento das vigas celulares nas condições analisadas neste trabalho. Dessa forma, considerou-se que a adoção da força axial máxima permitida pelo VCA+ representa uma aproximação adequada para a modelagem dos elementos estudados.

4.3.4.4 Combinação de Ações

O programa VCA+ permite a definição de combinações de ações padronizadas ou personalizadas para o dimensionamento das vigas celulares. Neste trabalho, optou-se pela utilização do campo de **combinações personalizadas**, uma vez que os carregamentos e esforços correspondentes à situação mais crítica já haviam sido previamente determinados por meio da análise global realizada no SAP2000. Dessa forma, foi necessária apenas a inserção de uma única combinação no programa, reproduzindo diretamente a condição de dimensionamento mais desfavorável para cada elemento analisado. Essa abordagem simplificou o processo de modelagem e garantiu a compatibilidade entre as verificações realizadas nos dois programas, dispensando a geração e avaliação de múltiplas combinações de ações no VCA+.

As Figuras 47 e 48 representam as interfaces de inserção de combinações para as vigas e os pilares, respectivamente, que compõem o Modelo 1 (Pórtico 6-15).

Figura 47 - Tela de combinações de ações - Vigas

Combinações de ações

Estados-Limites Últimos | Estados-Limites de Serviço | Estados-Limites Últimos sob incêndio

De acordo com as regras

☐ Combinação n° 1	$\gamma_{G,Sup} G + \gamma_Q Q1 + \psi_0 \gamma_Q Q2$
	1,40 G + 1,50 Q1 + 1,05 Q2
☐ Combinação n° 2	$\gamma_{G,Sup} G + \psi_0 \gamma_Q Q1 + \gamma_Q Q2$
	1,40 G + 1,05 Q1 + 1,50 Q2
☐ Combinação n° 3	$\gamma_{G,Inf} G + \gamma_Q Q1 + \psi_0 \gamma_Q Q2$
	1,00 G + 1,50 Q1 + 1,05 Q2
☐ Combinação n° 4	$\gamma_{G,Inf} G + \psi_0 \gamma_Q Q1 + \gamma_Q Q2$
	1,00 G + 1,05 Q1 + 1,50 Q2

Combinações personalizadas

☒ Combinação n° 5	1,25 G + 1,50 Q1 + 1,00 Q2
☐ Combinação n° 6	0,00 G + 0,00 Q1 + 0,00 Q2

Cancelar OK

Fonte: VCA+, 2026

Figura 48 - Tela de combinações de ações - Pilares

Combinações de ações

Estados-Limites Últimos | **Estados-Limites de Serviço** | Estados-Limites Últimos sob incêndio

De acordo com as regras

☐ Combinação nº 1 $\gamma_{G,Sup} G + \gamma_Q Q1 + \psi_0 \gamma_Q Q2$
1,40 G + 1,50 Q1 + 1,05 Q2

☐ Combinação nº 2 $\gamma_{G,Sup} G + \psi_0 \gamma_Q Q1 + \gamma_Q Q2$
1,40 G + 1,05 Q1 + 1,50 Q2

☐ Combinação nº 3 $\gamma_{G,Inf} G + \gamma_Q Q1 + \psi_0 \gamma_Q Q2$
1,00 G + 1,50 Q1 + 1,05 Q2

☐ Combinação nº 4 $\gamma_{G,Inf} G + \psi_0 \gamma_Q Q1 + \gamma_Q Q2$
1,00 G + 1,05 Q1 + 1,50 Q2

Combinações personalizadas

☒ Combinação nº 5 0,00 G + 0,00 Q1 + 1,00 Q2

☐ Combinação nº 6 0,00 G + 0,00 Q1 + 0,00 Q2

Cancelar OK

Fonte: VCA+, 2026

4.3.4.5 Resultados

Concluídas as etapas de definição da geometria, dos carregamentos, das combinações de ações e das adaptações necessárias ao modelo estrutural, procedeu-se à execução da análise no programa VCA+. Ao término do processamento, o programa gera um relatório detalhado contendo os resultados das verificações realizadas, incluindo informações geométricas, esforços considerados, critérios para o Estado Limite de Serviço e verificações do Estado Limite Último.

Entre os resultados disponibilizados, destaca-se o índice de aproveitamento da seção para cada um dos modos de falha avaliados pelo programa. Esse indicador expressa a relação entre a solicitação atuante e a capacidade resistente da seção para cada mecanismo de falha, permitindo identificar quais verificações governam o dimensionamento da viga celular e o respectivo nível de utilização da seção. A Figura 49 apresenta um trecho do relatório gerado

pelo VCA+ para a verificação estrutural das vigas do Modelo 2 (Pórtico 6-25), destacando os índices de aproveitamento correspondentes aos diferentes modos de falha analisados.

Figura 49 - Tela do relatório com a Análise do ELU - Viga do Modelo 2 (Pórtico 6-25)

ESTADOS-LIMITES ÚLTIMOS (ELU)

Resumo dos critérios

Verificações das seções líquidas nas aberturas

Resistência ao momento fletor (Abert. n° 1 - Comb. U5) :	$\Gamma_{M,max}$	= 0,657	✓
Resistência à força normal (Abert. n° 23 - Comb. U5) :	$\Gamma_{N,max}$	= 0,515	✓
Resistência à força cortante (Abert. n° 1 - Comb. U5) :	$\Gamma_{V,max}$	= 0,464	✓
Resistência à interação M+N (Abert. n° 1 - Comb. U5) :	$\Gamma_{MN,max}$	= 0,992	✓
Resistência à interação N+V (Abert. n° 23 - Comb. U5) :	$\Gamma_{NV,max}$	= 0,515	✓
Resistência à interação M+V (Abert. n° 1 - Comb. U5) :	$\Gamma_{MV,max}$	= 0,657	✓
Resistência à interação M+N+V (Abert. n° 1 - Comb. U5) :	$\Gamma_{MNV,max}$	= 0,992	✓

Verificações da alma

Verificação de flambagem por cisalhamento (Montante n° 44 - Comb. U5) $\Gamma_{Vbw,max}$	= 0,108	✓
--	---------	---

Verificações dos montantes

Resistência ao cisalhamento (Montante n° 1 - Comb. U5) :	$\Gamma_{Vh,max}$	= 0,353	✓
Resistência à flambagem (Montante n° 44 - Comb. U5) :	$\Gamma_{b,max}$	= 0,565	✓
espessura mínima da garganta (Montante n° 1 - Comb. U5) :	a_{min}	= 0,94 mm	
Aviso: a espessura da garganta é avaliada assumindo duas soldas			
A espessura total das soldas deve ser de pelo menos 1,88 mm			
Atenção: a espessura da garganta da solda de filete deve ser de pelo menos 3 mm			

Verificações das seções brutas

Resistência à flexão (Extremidade esquerda - Comb. U5) :	$\Gamma_{Mg,max}$	= 0,465	✓
Resistência ao cisalhamento (Extremidade esquerda - Comb. U5) $\Gamma_{Vg,max}$	= 0,072		✓

Outras verificações

Resistência à flambagem lateral com torção	$\Gamma_{LT,max}$	= 0,795	✓
--	-------------------	---------	---

Atenção

A estabilidade da viga sob força normal não é verificada pelo VCA+

Fonte: VCA+, 2026

Assim como no dimensionamento dos pórticos compostos por perfis de alma cheia, buscou-se, para as vigas celulares, a definição das seções mais eficientes possíveis. Dessa forma, o processo consistiu na avaliação iterativa de diferentes perfis até a obtenção de uma configuração que atendesse a todas as verificações com o menor excedente de peso possível. Em razão desse critério de otimização, já era esperado que os índices de aproveitamento apresentados pelo programa fossem, em sua maioria, próximos de 100%, indicando uma

utilização eficiente da capacidade resistente da seção sem comprometer sua segurança estrutural.

A Tabela 9 reúne os perfis celulares selecionados para cada modelo, apresentando o peso linear correspondente aos perfis originais, antes da expansão, bem como os pesos totais dos elementos após o processo de expansão e corte. Essa síntese permite visualizar as seções finais obtidas no dimensionamento e constitui a base para as comparações desenvolvidas nos tópicos subsequentes.

Tabela 9 - Resumo dos perfis celulares aprovados após análise do ELU

ESTADO LIMITE ÚLTIMO						
Modelo	Pilares			Vigas		
	Perfil aprovado	Peso Linear (kg/m)	Peso Total (kg)	Perfil aprovado	Peso Linear (kg/m)	Peso Total (kg)
Pórtico 6-15	VCS 300x28	28,2	308,0	VCS 300x23	22,6	316,6
Pórtico 6-25	VCS 450x47	47,4	486,0	VCS 400x39	39,1	899,5
Pórtico 6-35	VCS 550x69	69,4	722,0	VCS 500x60	60,0	1887,1
Pórtico 10-15	VCS 400x46	45,7	798,0	VCS 300x23	22,6	300,3
Pórtico 10-25	VCS 400x46	45,7	798,0	VCS 450x42	41,6	894,4
Pórtico 10-35	VCS 550x63	63,2	1146,0	VCS 550x63	63,2	2026,1

Fonte: Autoria própria, 2026

4.3.5 Verificação do ELS

A verificação do Estado-Limite de Serviço (ELS) dos perfis celulares não constitui uma etapa determinante para o presente trabalho, uma vez que o aumento da altura da seção e, consequentemente, de sua rigidez à flexão, conduz naturalmente a um melhor desempenho quanto às deformações quando comparado aos perfis de alma cheia. Ainda assim, optou-se por realizar essa análise com o objetivo de quantificar o ganho de rigidez proporcionado pela expansão das seções e subsidiar a comparação entre as soluções estruturais estudadas. A Tabela 10 apresenta uma comparação entre as propriedades de inércia dos perfis de alma cheia e dos perfis celulares, considerando a seção bruta na região dos montantes, a seção líquida na região das aberturas e a inércia média das seções expandidas.

Tabela 10 - Comparação entre as inércias das soluções estruturais

Comparação Inércias						
Modelo	Elemento	Perfil AC Final	Perfil Celular			Aumento Percentual (%)
			Seção Bruta	Seção Líquida	Inércia Média	
Pórtico 6-15	Pilares	7047	14177	12711	13444	90,8
	Vigas	4856	10755	9289	10022	106,4
Pórtico 6-25	Pilares	27249	47554	37440	42497	56,0
	Vigas	13307	32888	28416	30652	130,3
Pórtico 6-35	Pilares	42768	104634	85980	95307	122,8
	Vigas	34416	78136	67045	72590,5	110,9
Pórtico 10-15	Pilares	16679	40112	34950	37531	125,0
	Vigas	6492	10755	9289	10022	54,4
Pórtico 10-25	Pilares	16679	40112	34950	37531	125,0
	Vigas	22640	41230	34668	37949	67,6
Pórtico 10-35	Pilares	52747	98089	81813	89951	70,5
	Vigas	42556	98089	83169	90629	113,0

Fonte: Autoria própria, 2026

Entretanto, em razão das adaptações metodológicas necessárias para a utilização do VCA+ em sistemas aporticados, os deslocamentos fornecidos diretamente pelo programa não representariam de forma adequada o comportamento global da estrutura, não constituindo um parâmetro confiável para comparação com os pórticos compostos por perfis de alma cheia. Assim, optou-se por realizar a verificação dos deslocamentos no SAP2000, empregando seções genéricas equivalentes aos perfis celulares dimensionados.

Essas seções equivalentes foram definidas mantendo-se as dimensões externas dos perfis celulares — altura expandida, largura das mesas e espessuras das mesas —, variando-se apenas a espessura da alma até que a inércia da seção coincidisse com a inércia média do respectivo perfil celular. A partir da obtenção dessas seções equivalentes, os modelos estruturais foram analisados no SAP2000 utilizando os mesmos carregamentos e combinações de ações raras definidas anteriormente, permitindo a determinação dos deslocamentos verticais e horizontais dos pórticos. Os resultados dessa verificação são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Verificação do ELS dos pórticos em perfil celular

Verificação ELS		
Modelo	Deformações para os Perfis Celulares (cm)	
Pórtico 6-15	Δy	2,12
	Δx	0,35
Pórtico 6-25	Δy	3,76
	Δx	0,61
Pórtico 6-35	Δy	4,91
	Δx	0,76
Pórtico 10-15	Δy	2,06
	Δx	1,65
Pórtico 10-25	Δy	5,07
	Δx	0,86
Pórtico 10-35	Δy	6,92
	Δx	1,13

Fonte: Autoria própria, 2026

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 COMPARAÇÃO EM PESO LINEAR

Concluídas as etapas de dimensionamento dos pórticos compostos por perfis de alma cheia e perfis celulares, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos, com o objetivo de avaliar a eficiência estrutural de cada solução. Inicialmente, a análise concentrou-se nos parâmetros relacionados ao consumo de aço, por meio da comparação entre os pesos dos perfis adotados e dos pórticos dimensionados, uma vez que essa variável apresenta influência direta tanto no desempenho estrutural quanto nos aspectos econômicos da solução.

As tabelas apresentadas a seguir reúnem, de forma sintetizada, os resultados obtidos para cada modelo estudado, relacionando os pesos lineares dos perfis selecionados e os pesos totais dos pórticos nas configurações em alma cheia e celular. A partir desses resultados, torna-se possível quantificar os ganhos ou perdas proporcionadas pela adoção de perfis celulares, estabelecendo uma base objetiva para as discussões desenvolvidas na sequência.

A primeira comparação realizada refere-se aos pesos lineares dos perfis adotados no dimensionamento. Para essa análise, foram considerados os perfis soldados de alma cheia (VS) empregados nos pórticos convencionais e os perfis celulares VCS utilizados como perfis de origem para a fabricação das vigas celulares, isto é, antes do processo de expansão e corte. Essa comparação permite avaliar as diferenças entre as seções inicialmente selecionadas para cada solução estrutural, independentemente das alterações geométricas decorrentes da expansão dos perfis celulares.

A Tabela 12 apresenta os pesos lineares, obtidos a partir dos catálogos dos respectivos fabricantes, para as vigas e os pilares de cada modelo analisado, bem como a diferença percentual entre as soluções em alma cheia e celular. Esses resultados constituem uma primeira avaliação do potencial de redução no consumo de aço proporcionado pela adoção dos perfis celulares, considerando exclusivamente as seções de origem utilizadas no dimensionamento.

Tabela 12 - Comparação entre pesos lineares dos Perfis VS de Alma Cheia e Perfis Originais VCS

Modelo	Peso Linear Pilares (kg/m)			Peso Linear Vigas (kg/m)		
	Alma Cheia	Celular	Diferença (%)	Alma Cheia	Celular	Diferença (%)
Pórtico 6-15	33,2	28,2	-15,1	24,6	22,6	-8,1
Pórtico 6-25	58,6	47,4	-19,1	36,9	39,1	6,0
Pórtico 6-35	72,5	69,4	-4,3	61,1	60,0	-1,8
Pórtico 10-15	44,0	45,9	4,3	31,3	22,6	-27,8
Pórtico 10-25	44,0	45,9	4,3	51,2	41,6	-18,8
Pórtico 10-35	75,0	63,2	-15,7	63,6	63,2	-0,6

Fonte: Autoria própria, 2026

Os resultados apresentados na Tabela 12 evidenciam uma tendência favorável aos perfis celulares. Das 12 comparações realizadas entre vigas e pilares, 9 resultaram em redução do peso linear das soluções celulares em relação aos perfis de alma cheia, correspondendo a 75% dos casos analisados. Dentre essas reduções, cinco apresentaram diferenças superiores a 15%, evidenciando a otimização conferida aos perfis VCS para atender às mesmas exigências de desempenho estrutural demandadas aos pórticos convencionais.

Observa-se ainda que os poucos casos em que os perfis celulares apresentaram peso linear superior ao das soluções convencionais corresponderam a acréscimos relativamente modestos, limitados a 6,0%. Em contrapartida, as reduções atingiram valores próximos de 28%, evidenciando que, quando os perfis celulares se mostram vantajosos, os ganhos obtidos tendem a ser significativamente superiores às eventuais perdas observadas. Esse comportamento demonstra a maior eficiência estrutural proporcionada pela geometria expandida das vigas celulares, permitindo que perfis originais mais leves atendam aos requisitos de resistência e estabilidade após o processo de expansão.

Complementando a análise apresentada anteriormente, a segunda comparação tratou das seções finais obtidas para as soluções, ou seja, após o processo de expansão dos perfis VCS. Diferentemente da comparação inicial, que considerou os perfis VCS de origem utilizados para a fabricação dos elementos celulares, esta análise teve como objetivo avaliar o comportamento dos perfis em sua configuração final de utilização. Para isso foram consideradas as alturas “d”

dos perfis VS de alma cheia e as alturas “ H_t ” dos perfis celulares expandidos. A partir daí, comparou-se os pesos lineares dos perfis VS, obtidos a partir dos valores de catálogo, com os pesos lineares efetivos dos perfis celulares expandidos, calculados pela razão entre o peso total dos elementos do pórtico e seus respectivos comprimentos.

Antes da apresentação da Tabela 13, cabe destacar que os pesos lineares obtidos para os perfis celulares em sua configuração final são, naturalmente, inferiores aos pesos lineares dos perfis VCS de origem utilizados no pré-dimensionamento. Isso ocorre porque as seções expandidas derivam dos mesmos perfis VCS iniciais, porém passam por cortes e deslocamentos ao longo do processo de fabricação, resultando em pequenos descartes de material e, conseqüentemente, em uma redução do peso efetivo da seção final.

Tabela 13 - Comparação entre o peso linear e altura dos Perfis de Alma Cheia Finais e Perfis Celulares Expandidos

Modelo	Pilares				Vigas			
	Alma Cheia		Celulares		Alma Cheia		Celulares	
	Altura d (mm)	Peso Linear (kg/m)	Altura H_t (mm)	Peso Linear (kg/m)	Altura d (mm)	Peso Linear (kg/m)	Altura H_t (mm)	Peso Linear (kg/m)
Pórtico 6-15	300	33,2	450	25,7	300	24,6	450	20,8
Pórtico 6-25	450	58,6	675	40,5	400	36,9	600	35,4
Pórtico 6-35	500	72,5	825	60,2	500	61,1	750	53,1
Pórtico 10-15	400	44,0	600	39,9	300	31,3	450	19,7
Pórtico 10-25	400	44,0	600	39,9	450	51,2	660	35,2
Pórtico 10-35	550	75,0	825	57,3	550	63,6	825	57,1

Fonte: Autoria própria, 2026

Enquanto a comparação inicial permitiu avaliar a eficiência dos perfis de origem selecionados no dimensionamento, a segunda análise demonstra o comportamento efetivo das seções finais após a expansão. Dessa forma, evidencia-se que o ganho de altura dos perfis celulares não resultou em aumento proporcional do peso linear, permitindo a obtenção de elementos mais altos e, ao mesmo tempo, mais leves que os perfis VS de alma cheia adotados para os pórticos convencionais.

5.2 COMPARAÇÃO EM PESO TOTAL

Embora a comparação entre os pesos lineares dos perfis constitua um importante indicador da eficiência das seções adotadas no dimensionamento, ela não representa, isoladamente, o consumo de aço da estrutura. Isso porque o peso efetivamente empregado em cada solução depende não apenas da massa por unidade de comprimento dos perfis, mas também das dimensões finais dos elementos estruturais e das alterações geométricas decorrentes do processo de fabricação das vigas celulares, como a expansão da seção e os cortes realizados na alma.

Dessa forma, a comparação entre os pesos totais dos pórticos torna-se mais representativa para a avaliação da eficiência estrutural das soluções estudadas, uma vez que reflete a quantidade efetiva de aço empregada em cada modelo. Além de permitir uma análise mais consistente do potencial de redução do consumo de material, esse parâmetro está diretamente relacionado a aspectos técnicos e econômicos relevantes, como a diminuição das cargas permanentes atuantes sobre a estrutura, a redução das solicitações transmitidas às fundações, a otimização dos processos de fabricação, transporte e montagem e, consequentemente, a possibilidade de redução dos custos globais da obra.

Com o objetivo de facilitar a análise dos resultados, foram elaboradas duas tabelas complementares. A primeira, apresentada na Tabela 14, reúne os pesos totais dos pilares, das vigas e dos pórticos dimensionados em perfis de alma cheia e em perfis celulares, considerando as seções finais aprovadas para cada solução estrutural. Na sequência, a Tabela 15 apresenta as diferenças absolutas e percentuais entre os pesos totais dos pórticos, permitindo uma avaliação direta dos ganhos obtidos com a adoção dos perfis celulares.

Tabela 14 - Resumo dos pesos totais de Pilares, Vigas e Pórticos completos

Modelo	Pórticos em Perfis de Alma Cheia			Pórticos em Perfis Celulares		
	Peso Pilares (kg)	Peso Vigas (kg)	Peso Total (kg)	Peso Pilares (kg)	Peso Vigas (kg)	Peso Total (kg)
Pórtico 6-15	398,4	374,4	772,8	308,0	316,6	624,6
Pórtico 6-25	703,2	936,5	1639,7	486,0	899,5	1385,5
Pórtico 6-35	870,0	2169,7	3039,7	722,0	1887,1	2609,1
Pórtico 10-15	880,0	476,4	1356,4	798,0	300,3	1098,3
Pórtico 10-25	880,0	1299,5	2179,5	798,0	894,4	1692,4
Pórtico 10-35	1500,0	2258,4	3758,4	1146,0	2026,1	3172,1

Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 15 - Diferenças Absoluta e Percentual entre o peso dos Pórticos

Modelo	Dif. Absoluta (kg)	Dif. Percentual (%)
Pórtico 6-15	-148,2	-19,2
Pórtico 6-25	-254,2	-15,5
Pórtico 6-35	-430,6	-14,2
Pórtico 10-15	-258,1	-19,0
Pórtico 10-25	-487,1	-22,3
Pórtico 10-35	-586,3	-15,6

Fonte: Autoria própria, 2026

A análise da Tabela 14 evidencia a eficiência dos perfis com aberturas, revelando que todos os elementos dos pórticos compostos por perfis celulares apresentaram peso total inferior ao das respectivas soluções em alma cheia. Esse comportamento foi verificado tanto para as vigas quanto para os pilares, inclusive nos modelos em que os perfis VCS de origem apresentavam peso linear ligeiramente superior ao dos perfis VS, conforme discutido anteriormente.

Esse resultado decorre das características próprias da solução celular. O processo de expansão e corte da alma remove parte do material originalmente existente, reduzindo o peso efetivo das vigas celulares. Como consequência, mesmo quando o perfil de origem apresenta peso linear semelhante ou ligeiramente superior ao da solução convencional, o elemento final resulta mais leve, refletindo diretamente na redução do peso global dos pórticos.

A Tabela 15 corrobora com a visão de elevada eficiência das soluções em perfis celulares quanto à redução do consumo de aço dos pórticos. Em todos os modelos analisados foi observada diminuição do peso total da estrutura, com reduções variando entre **14,2%** e **22,3%**, correspondendo a uma redução média de **17,6%** em relação aos pórticos dimensionados com perfis de alma cheia. Esses resultados demonstram que a adoção de perfis celulares proporcionou ganhos consistentes em todos os cenários avaliados, independentemente do vão ou da altura dos pilares.

Embora reduções da ordem de 15% a 20% possam, à primeira vista, parecer moderadas, seu impacto torna-se bastante expressivo quando analisado no contexto de estruturas reais. Em galpões industriais e edificações similares, é comum a repetição de dezenas de pórticos ao longo da edificação, de modo que a economia obtida em cada módulo é acumulada em toda a estrutura. Nessas situações, a redução do consumo de aço pode representar uma economia significativa de material, além de contribuir para a diminuição das cargas permanentes transmitidas às fundações, redução dos custos de fabricação, transporte e montagem e maior competitividade da solução estrutural como um todo.

Os resultados obtidos indicam que a utilização de perfis celulares não apenas atende aos critérios de resistência e desempenho estabelecidos para os modelos analisados, como também constitui uma alternativa estrutural mais eficiente sob o ponto de vista do consumo de aço, evidenciando seu potencial de aplicação em sistemas aporricados de edificações industriais e comerciais.

5.3 COMPARAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

Conforme apresentado anteriormente, a expansão dos perfis celulares proporcionou um aumento significativo da inércia das seções, conforme evidenciado na Tabela 10, exposta na seção 4.3.5 que trata do dimensionamento quanto ao ELS dos perfis celulares. Em comparação aos perfis de alma cheia dimensionados para os mesmos modelos, os perfis celulares apresentaram acréscimos de inércia que variaram de **54,4%** a **130,3%**, em função da maior altura útil adquirida após o processo de expansão.

Considerando que a rigidez à flexão de um elemento estrutural está diretamente relacionada ao seu momento de inércia, era esperado que essa característica se refletisse em um melhor desempenho dos pórticos quanto aos deslocamentos do Estado Limite de Serviço. Este

comportamento foi confirmado por meio dos resultados da análise, detalhados na Tabela 11, também presente na seção 4.3.5.

Com o objetivo de quantificar de forma ainda mais clara esse benefício, foi realizada a comparação entre os deslocamentos máximos obtidos para as soluções em perfis de alma cheia e em perfis celulares, considerando os deslocamentos verticais das vigas e os deslocamentos horizontais no topo dos pilares. A Tabela 16 reapresenta os valores em centímetros obtidos para cada modelo, bem como as reduções absolutas e percentuais verificadas com a adoção dos perfis celulares.

Tabela 16 - Comparação entre os deslocamentos obtidos pelos Pórticos

Comparativo Deslocamentos					
Modelo	Perfis Alma Cheia		Perfis Celulares		Diminuição Percentual (%)
Pórtico 6-15	Δy	5,7	Δy	2,12	62,8
	Δx	1,0	Δx	0,35	65,0
Pórtico 6-25	Δy	9,9	Δy	3,76	62,0
	Δx	1,7	Δx	0,61	64,1
Pórtico 6-35	Δy	11,8	Δy	4,91	58,4
	Δx	1,9	Δx	0,76	60,0
Pórtico 10-15	Δy	3,6	Δy	2,06	42,8
	Δx	3,3	Δx	1,65	50,0
Pórtico 10-25	Δy	9,7	Δy	5,07	47,7
	Δx	1,7	Δx	0,86	49,4
Pórtico 10-35	Δy	13,2	Δy	6,92	47,6
	Δx	2,2	Δx	1,13	48,6

Fonte: Autoria própria, 2026

Os resultados apresentados na Tabela 16 confirmam a influência direta do aumento da rigidez das seções celulares sobre o comportamento em Estado Limite de Serviço dos pórticos. Conforme discutido anteriormente, a expansão dos perfis proporcionou um incremento expressivo do momento de inércia das seções, com aumento médio de **97,7%** em relação aos perfis de alma cheia, ou seja, com a inércia mais que dobrando para a maior parte dos modelos após a expansão. Esse ganho de rigidez refletiu diretamente na redução dos deslocamentos estruturais dos pórticos.

Verifica-se que todos os modelos analisados apresentaram reduções significativas tanto dos deslocamentos verticais das vigas quanto dos deslocamentos horizontais dos pilares. As

reduções percentuais variaram entre **42,8%** e **65,0%**, com média de **54,9%**, indicando que, em termos gerais, a utilização dos perfis celulares foi capaz de reduzir aproximadamente pela metade os deslocamentos observados nos pórticos compostos por perfis de alma cheia. Esses resultados corroboram o comportamento esperado para elementos com maior rigidez à flexão e demonstram que os ganhos proporcionados pelo aumento da inércia das seções se traduzem em melhorias efetivas no desempenho global da estrutura, ampliando a margem de atendimento aos critérios de deslocamentos estabelecidos para o Estado Limite de Serviço.

Observa-se, ainda, que as reduções de deslocamento foram mais expressivas nos pórticos com pilares de 6 metros de altura. Esse comportamento pode ser atribuído à maior rigidez global desses modelos, uma vez que pilares mais baixos apresentam menor esbeltez e, consequentemente, menor deformabilidade. Dessa forma, embora todos os modelos tenham apresentado melhorias significativas no Estado Limite de Serviço, os benefícios mostraram-se mais pronunciados nos pórticos de menor altura.

Sob o ponto de vista prático, essa característica representa uma importante vantagem para o dimensionamento de galpões em aço, especialmente aqueles com maiores vãos livres. Nessas estruturas, é comum que os critérios de Estado Limite de Serviço, particularmente os limites de deslocamento vertical das vigas de cobertura, governem o dimensionamento antes mesmo do atendimento às verificações de resistência do Estado Limite Último. Dessa forma, o aumento de rigidez proporcionado pelos perfis celulares amplia a margem de atendimento aos critérios de flecha, possibilitando a adoção de soluções estruturalmente mais eficientes e, em muitos casos, mais leves.

5.4 VALIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

A Tabela 17 apresenta a relação entre a altura expandida das vigas celulares (H_t) e o vão correspondente para as seções finais aprovadas no dimensionamento. Conforme discutido no capítulo 4.3.2, para o pré-dimensionamento foi adotada a relação **Vão/45**, com o objetivo de estimar a altura inicial dos perfis antes do processo de verificação estrutural. Os resultados obtidos indicaram uma relação média de, aproximadamente, **Vão/39**, evidenciando que o critério adotado forneceu estimativas compatíveis com as soluções finais encontradas e pode ser considerado razoável para o pré-dimensionamento de vigas celulares em pórticos em aço.

Tabela 17 - Validação das relações de Pré-Dimensionamento

RELAÇÃO ALTURA/VÃO		
Modelo	Ht Vigas (mm)	Relação Ht/Vão
Pórtico 6-15	450	33
Pórtico 6-25	600	42
Pórtico 6-35	750	47
Pórtico 10-15	450	33
Pórtico 10-25	660	38
Pórtico 10-35	825	42

Fonte: Autoria própria, 2026

Observa-se, ainda, uma tendência de aumento do denominador da relação altura/vão à medida que os vãos aumentam. Enquanto os pórticos com vão de 15 m apresentaram relação próxima de **Vão/33**, os modelos de 25 m e 35 m resultaram em relações compreendidas entre **Vão/38** e **Vão/47**. Esse comportamento indica que o crescimento da altura expandida não ocorreu de forma proporcional ao aumento dos vãos, evidenciando que a maior eficiência estrutural proporcionada pelos perfis celulares permitiu reduzir a influência do vão sobre a definição da altura das vigas. Dessa forma, foi possível vencer vãos maiores com um incremento relativamente menor da altura das seções, sem comprometer o atendimento aos critérios de resistência e de serviço.

Ressalta-se, por fim, que essa análise foi realizada apenas para as vigas, uma vez que o pré-dimensionamento dos pilares não foi condicionado exclusivamente pela relação entre altura e comprimento do elemento. Em diversos modelos, a definição da seção dos pilares foi influenciada pela necessidade de compatibilização da largura das mesas com as vigas, requisito adotado para viabilizar as ligações estruturais e a montagem dos pórticos.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho permitiram concluir que a utilização de perfis celulares em pórticos em aço constitui uma alternativa técnica e economicamente viável em relação aos perfis I soldados de alma cheia. A metodologia desenvolvida possibilitou a adaptação das ferramentas de dimensionamento disponíveis para representar adequadamente o comportamento estrutural dos sistemas aporticados, permitindo uma comparação consistente entre as duas soluções e evidenciando as potencialidades da aplicação dos perfis celulares nesse tipo de estrutura.

Sob o aspecto econômico, verificou-se que a adoção dos perfis celulares resultou em redução do consumo de aço em todos os modelos analisados, demonstrando que o aumento da resistência proporcionado pela expansão das seções foi suficiente para compensar a remoção de material decorrente da formação das aberturas. Dessa forma, foi possível obter pórticos estruturalmente seguros com menor massa de aço, característica que pode representar economia significativa quando aplicada a edificações compostas por grande número de pórticos, como galpões industriais e centros logísticos.

Do ponto de vista do desempenho estrutural, os perfis celulares também apresentaram comportamento superior no Estado Limite de Serviço. O expressivo aumento da rigidez das seções refletiu diretamente na redução dos deslocamentos dos pórticos, ampliando a margem de atendimento aos limites normativos de flecha e tornando essa solução particularmente interessante para estruturas de grandes vãos, nas quais os critérios de deformabilidade frequentemente condicionam o dimensionamento antes mesmo das verificações de resistência.

Outro aspecto relevante evidenciado refere-se à validação dos critérios adotados para o pré-dimensionamento dos perfis celulares. Em razão da inexistência de normas técnicas específicas para o dimensionamento de elementos com aberturas na alma e da ainda limitada difusão dessa tecnologia no Brasil, foi necessário recorrer a recomendações aproximadas da literatura especializada, com destaque para Oliveira (2012) e para o Manual de Vigas Celulares da ArcelorMittal (2025).

Os resultados obtidos demonstraram que as relações inicialmente adotadas forneceram estimativas compatíveis com as seções finais aprovadas, indicando que tais referências constituem um ponto de partida consistente para o dimensionamento de pórticos em perfis

celulares. Dessa forma, além de avaliar a viabilidade estrutural dessa solução, o trabalho contribui para consolidar parâmetros de pré-dimensionamento e geometria de cortes que poderão servir de apoio a futuros estudos e aplicações práticas.

Além dos ganhos quantitativos observados, o trabalho evidenciou que os perfis celulares oferecem vantagens complementares relevantes para a concepção de pórticos em aço. A presença de aberturas na alma favorece a integração das instalações prediais à estrutura, possibilita soluções arquitetônicas com maior leveza visual e contribui para o melhor aproveitamento da iluminação natural. Tais características, associadas à redução do consumo de aço e à melhoria do desempenho quanto ao Estado Limite de Serviço, reforçam o potencial dos perfis celulares como alternativa eficiente para edificações de grandes vãos, especialmente em aplicações como as ressaltadas ao longo do trabalho.

No que se refere às ferramentas computacionais utilizadas, o programa VCA+ demonstrou desempenhar adequadamente seu papel no dimensionamento de perfis celulares, contribuindo para suprir uma importante lacuna existente na disponibilidade de ferramentas de cálculo para elementos com aberturas na alma. Sua aplicação neste trabalho possibilitou a verificação dos principais modos de falha associados às vigas celulares e forneceu subsídios relevantes para a comparação entre as soluções estruturais analisadas. No entanto, por se tratar de uma versão inicial, foram identificadas limitações para sua aplicação, especialmente relacionadas ao escopo restrito a vigas isoladas e à necessidade de adaptações metodológicas para a representação de sistemas estruturais mais complexos. Essas limitações, discutidas nos capítulos anteriores, não invalidam os resultados obtidos, mas indicam oportunidades para o aprimoramento futuro da ferramenta e para o desenvolvimento de procedimentos de cálculo ainda mais abrangentes para perfis com aberturas.

Como **sugestões para trabalhos futuros**, destaca-se a ampliação das investigações relacionadas às diferentes possibilidades de aplicação do programa VCA+ no dimensionamento de perfis celulares. Estudos adicionais podem contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de **vigas mistas** com perfis celulares, bem como para a avaliação do desempenho estrutural de **vigas celulares curvas**, especialmente quanto ao potencial ganho de rigidez e à redução dos deslocamentos. Também se mostram relevantes pesquisas voltadas às aplicações de **vigas celulares de altura variável**, envolvendo tanto a identificação das situações estruturais mais favoráveis ao seu emprego quanto o aprofundamento dos

procedimentos de cálculo associados a essa tipologia. Além disso, recomenda-se investigar o desempenho de **outras geometrias de aberturas** na alma e a utilização de perfis celulares em **sistemas de piso**, considerando as particularidades de carregamento e de verificação estrutural inerentes a esse tipo de aplicação.

Adicionalmente, recomenda-se o acompanhamento da evolução das informações técnicas relacionadas aos perfis celulares, tendo em vista que seu dimensionamento ainda se encontra em desenvolvimento no contexto brasileiro. Nesse sentido, futuras pesquisas podem contribuir para a consolidação de outras referências bibliográficas especializadas, para a comparação entre diferentes metodologias e novas ferramentas de cálculo e para a análise do eventual surgimento de normas técnicas específicas aplicáveis a elementos com aberturas na alma. O aprofundamento desses aspectos tende a ampliar a segurança e a confiabilidade dos procedimentos de dimensionamento, favorecendo a disseminação e a aplicação mais abrangente dos perfis celulares em projetos de estruturas em aço.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. M. P. **Determinação do momento fletor resistente à Flambagem Lateral com Torção de vigas de aço celulares**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011, 90p.
- ARCELORMITTAL EUROPE – LONG PRODUCTS. **ACB® and Angelina® beams: a new generation of beams with large web openings**. 1. ed. Luxemburgo: ArcelorMittal Europe, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Informações estatísticas do IBGE**. Disponível em: <<https://www.abcem.org.br/site/informacoes-estatisticas-do-ibge>>. Acesso em: 31 mar. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884:2013**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 32p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:2019**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019. 61p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:2023**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2023. 95p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681:2025**: Ações e segurança nas estruturas — Procedimento. Rio de Janeiro, 2025. 23p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2024**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2024. 276p.
- BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo**. 7. ed. Oficina de Textos, 2024.
- BELLON, F. G. **Análise da capacidade de plastificação de vigas casteladas de aço sujeitas à flexão simples**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2021, 101p.
- BRINKHUS, R. N. **Análise de vigas casteladas e vigas casteladas mistas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015, 168p.
- BS 5950-1:2000 (2001). **Structural use of steel in building – Part: Code of practice for design – Rolled and welded sections**. British Standards Institution (BSI), 2001.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Construção civil leva 38% da produção**. Disponível em: <<https://cbic.org.br/construcao-civil-leva-38-da-producao/>>. Acesso em: 31 mar. 2026.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Estatísticas**. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/estatisticas>>. Acesso em: 31 mar. 2026.

CHUNG, K.F.; LIU, C. H.; KO, A. C. H. **Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design using moment-shear interaction curve.** Journal of Construction Steel Research, Vol. 59, 2003

FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto.** São Paulo: Pearson, 2016.

FARES, S.S.; COULSON, J.; DINEHART, D.W. **Castellated and Cellular Beam Desing. Steel Design Guide #31.** American Institute of Steel Construction, 2016.

FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; ROSSI, A.; VIEIRA, W. B. **Análise numérica de vigas celulares considerando as imperfeições físicas com a variação das imperfeições geométricas.** In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA UNICESUMAR (EPCC), Maringá. UniCesumar, 2015. p. 4–8.

GRILO, L.F. **Formulação para determinação da força cortante resistente de flambagem do montante de alma em vigas celulares de aço.** Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE/UFGM, 2018.

HOSAIN, M. U., SPEIRS, W. G. **An experimental investigation of expanded open-web steel beams.** In: Congres EIC. Ottawa. 1970.

KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. **Failure modes for castellated beams.** Journal of Constructional Steel Research, v. 4, p. 295-315, 1984.

MACHADO, P. H. C. **Estudo comparativo da utilização de perfis laminados e formados a frio em coberturas de aço.** Trabalho de Conclusão de Curso. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2024, 97p.

MORO, G. M. **Dimensionamento ótimo de vigas mistas alveolares de aço e concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2021, 86p

OLIVEIRA, L.B. **Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura.** Dissertação de Mestrado. Viçosa: UFV, 2012.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

REZAEI, Niloufar. **Análise comparativa de pórticos de galpões industriais com perfis castelados e de alma cheia.** Trabalho de Conclusão de Curso. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2016, 76p

SALMON, Charles G.; JOHNSON, John E.; MALHAS, Faris A. **Steel structures: design and behavior: emphasizing load and resistance factor design.** 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2009.

SAKIYAMA, E. K. H. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma cisalhamento em vigas casteladas soldadas.** Dissertação de Mestrado. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2018.

SOLAR GROUP. **Isopletas brasileiras: entenda porque é importante compreendê-las!**. 2024. Disponível em: <<https://solargroup.com.br/isopletas-brasileiras-entenda-porque-e-importante-compreende-las/>> Acesso em: 05 abr. 2026.

TSAVDARIDIS, K., D.; D'MELLO, C.. **Behavior and Strength of Perforated Steel Beams with Novel Web Opening Shapes**. Journal of Construction Steel Research, v. 67, p. 1605-1620, 2011.

VCA Plus. **Software para cálculo de vigas celulares**. ArcelorMittal Brasil, 2025.

VERÍSSIMO, G. S.; VIEIRA, W. B.; SILVEIRA, E. G.; RIBEIRO, J. C. L.; PAES, J. L. R.; BEZERRA, E. M.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; FAKURY, R. H. **Dimensionamento de vigas alveolares de aço**. In: CONSTRUMETAL 2012 – Congresso Latino-Americano da Construção Metálica. São Paulo. ABCEM, 2012.

VERÍSSIMO, G. S.; SAKIYAMA, F. I. H. **Manual de vigas celulares**. 1. ed. [S.l.]: ArcelorMittal Brasil, 2025.

VERÍSSIMO, G. S.; SAKIYAMA, F. I. H.; PUPIN, L. A. L. Z.; CASTOLDI, R. S. **Vigas celulares de aço: conceito, características e aplicações**. In: CONSTRUMETAL 2025 – Congresso Latino-americano da Construção Metálica. São Paulo. ABCEM, 2025.