

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Contribuição ao estudo da flambagem do montante de alma por cisalhamento
em perfis alveolares de diferentes padrões**

Klaus Hubert Alves Rodrigues
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

KLAUS HUBERT ALVES RODRIGUES

**Contribuição ao estudo da flambagem do montante de alma por cisalhamento
em perfis alveolares de diferentes padrões**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Gustavo de Souza Verissimo

Coorientador: Jose Luiz Rangel Paes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R696c
2026

Rodrigues, Klaus Hubert Alves, 1999-
Contribuição ao estudo da flambagem do montante de alma
por cisalhamento em perfis alveolares de diferentes padrões /
Klaus Hubert Alves Rodrigues. – Viçosa, MG, 2026.
102 f.: il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.116>

1. Perfis estruturais de aço – Alma alveolar. 2. Flambagem
– Estruturas metálicas. 3. Cisalhamento (Mecânica). 4. Método
dos elementos finitos. 5. Simulação numérica. 6. Análise
paramétrica. 7. Confiabilidade estrutural – Análise estatística.
I. Veríssimo, Gustavo de Souza, 1965-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Mestrado em
Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. ? 624.1821

KLAUS HUBERT ALVES RODRIGUES

**Contribuição ao estudo da flambagem do montante de alma por cisalhamento
em perfis alveolares de diferentes padrões**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Klaus Hubert Alves Rodrigues
Autor

Gustavo de Souza Verissimo
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 28/03/2026 às 19:39:40 e pelo orientador em 28/03/2026 às 19:54:02. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **CTOD.JCJX.1PYM** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por iluminar meus caminhos e propiciar a conquista deste título, por me amparar e me manter firme ao longo de todos os desafios e por me ajudar a levantar diante de cada queda.

Aos meus pais Klaus Hubert Rodrigues Barbosa e Geiza Alves Pacheco Rodrigues Barbosa, por todo amor, companheirismo, carinho, cuidado, por confiarem em minha capacidade e auxiliarem a todo momento na minha formação. Essa conquista é nossa; sem vocês, nada disso seria possível.

Aos meus familiares, que torceram, incentivaram e estiveram presentes do início ao fim dessa jornada.

À Karen Coelho da Silva, por ser um exemplo de pessoa, por seu carinho, por ter me incentivado e por nunca medir esforços para me apoiar. Sou grato por me tornar uma pessoa melhor a cada dia; esta conquista não seria possível sem você.

Aos meus amigos, pelo apoio, incentivo, companheirismo, pela agradável convivência e troca de experiências, em especial aos pesquisadores Caio Pereira, Camila Altoé, Geysiane Milagres, Jean Emerick, João Vitor Altoé, Paloma Parassen, Pedro Drumond e Pedro Fialho.

Aos professores orientadores, que me acompanharam e prestaram todo auxílio necessário para o desenvolvimento do projeto.

Aos professores da Universidade Federal de Viçosa, pela colaboração e assistência durante o desenvolvimento do estudo.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação. Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

RODRIGUES, Klaus Hubert Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Contribuição ao estudo da flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis alveolares de diferentes padrões.** Orientador: Gustavo de Souza Verissimo. Coorientador: Jose Luiz Rangel Paes.

Perfis alveolares são elementos estruturais de aço com aberturas regulares na alma, sendo mais comuns os formatos hexagonais (perfis castelados) e circulares (perfis celulares). Essas aberturas alteram a distribuição de tensões e introduzem modos de falha específicos, entre eles a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV). Apesar dos avanços experimentais e numéricos nas últimas décadas, ainda persistem lacunas na literatura, incluindo a ausência de consenso quanto à metodologia de modelagem baseadas em um único montante de alma, escassez de estudos que investiguem conjuntamente perfis castelados e celulares e a falta de avaliações comparativas abrangentes entre modelos analíticos. Para suprir essas lacunas, foi calibrado um modelo numérico representativo de um único montante de alma, aplicável a perfis castelados e celulares. Foram avaliadas 50 metodologias de modelagem, totalizando 1600 simulações, com variações nas condições de contorno, malha e imperfeições geométricas iniciais. Com base nesse modelo, foi desenvolvido um estudo de variação de parâmetros composto por 6328 simulações numéricas (678 castelados e 5650 celulares), no qual foram avaliados os principais modelos analíticos para estimativa da resistência à FMAV, com análises estatísticas fundamentadas na EN 1990:2009. Os resultados evidenciaram discrepâncias entre as formulações disponíveis. Para perfis castelados, identificou-se um modelo com melhor desempenho global, embora com tendência à superestimação, o que motivou a proposição de um coeficiente redutor para estimativas ligeiramente conservadoras. Para perfis celulares, nenhum modelo apresentou desempenho estatisticamente satisfatório, sendo propostas modificações em formulação existente, com melhoria da precisão e comportamento favorável à segurança. De forma geral, o estudo consolida uma metodologia numérica unificada para avaliação da FMAV, recomenda modelos analíticos para estimativa da resistência e contribui para o aprimoramento do dimensionamento de perfis alveolares, com implicações diretas para aplicações práticas e futuras revisões normativas.

Palavras-chave: Perfil celular; Perfil castelado; Força cortante; Método dos elementos finitos; Análise estatística; Simulação numérica; Estudo de variação de parâmetros

ABSTRACT

RODRIGUES, Klaus Hubert Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Contribution to the study of shear-induced web-post buckling in alveolar beams with different opening patterns.** Adviser: Gustavo de Souza Verissimo. Co-adviser: Jose Luiz Rangel Paes.

Alveolar beams are steel structural members characterized by regular web openings, most commonly in hexagonal (castellated beams) and circular (cellular beams) configurations. These openings modify stress distribution and introduce specific failure modes, including web-post buckling (WPB). Despite significant experimental and numerical advances over the past decades, important gaps remain in the literature, such as the lack of consensus regarding modeling strategies based on a single web-post approach, the scarcity of studies jointly investigating castellated and cellular beams, and the scarcity of comprehensive comparative assessments of analytical models for different geometric patterns. To address these gaps, a representative numerical model based on a single web-post was calibrated and applied to both castellated and cellular beams. A total of 50 modeling strategies were evaluated, resulting in 1600 numerical simulations considering variation in boundary conditions, mesh discretization, and initial geometric imperfections. Building upon this framework, an extensive parametric study comprising 6328 numerical simulations (678 castellated and 5650 cellular beams) was conducted to assess the performance of the main analytical models available for predicting WPB resistance. Statistical analyses were performed in accordance with EN 1990:2009. The results revealed significant discrepancies among the available formulations. For castellated, one model exhibited the best overall performance, although with a slight tendency toward overestimation, which led to the proposal of a reduction factor to obtain mildly conservative predictions. For cellular beams, none of the existing models achieved statistically satisfactory performance, motivating modifications to an established formulation, which resulted in improved predictive accuracy and a safety consistent response. Overall, the study consolidates a unified numerical methodology for WPB assessment, recommends analytical model for WPB resistance prediction, and contributes to the improvement of the design of alveolar beams, providing technical support for practical applications and future code developments.

Keywords: Cellular beam; Castellated beam; Shear force; Finite Element Method; Statistical analysis; Numerical simulation; Parametric study.

LISTA DE SÍMBOLOS

a_0, a_1	Coeficiente para cálculo de k
$\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{d}, \hat{e}$	Coeficiente de ajuste para cálculo de χ_G
$\ddot{a}, \ddot{b}, \ddot{c}$	Coeficiente de ajuste para cálculo de χ_v
a_j	Coeficiente de ajuste para cálculo de $V_{p,Justino}$
b	Projeção horizontal do lado inclinado do alvéolo do perfil encastelado
b_e	Largura efetiva de compressão da alma
b_f	Largura da mesa do perfil
b_p	Largura do montante de alma da distância $y_{p,celular}$
b_w	Largura mínima do montante de alma
d	Altura do perfil original
d_g	Altura do perfil alveolar
f_y	Resistência ao escoamento do aço
h_{exp}	Projeção vertical do lado inclinado do alvéolo do perfil encastelado
h_o	Altura do alvéolo para perfis encastelados
h_p	Altura da chapa expansora
h_t	Altura do Tê
i	Raio de giração
k	Coeficiente para cálculo de V_{rk} de Wang <i>et al.</i> (2016) e b_e
\dot{k}	Coeficiente para cálculo de $l_{ef,panedpojman}$
$k_1, k_2, k_3,$	Coeficiente estatístico para cálculo de k
k_4, k_5	
k_p	Coeficiente limitador para cálculo de k
l	Comprimento de flambagem
l_{ef}	Comprimento efetivo de flambagem
$l_{ef,Grilo}$	Comprimento efetivo de flambagem proposto por Grilo <i>et al.</i> (2018)
$l_{ef,Justino}$	Comprimento efetivo de flambagem proposto por Justino <i>et al.</i> (2020)
$l_{ef,Lawson}$	Comprimento efetivo de flambagem proposto por Lawson, Oshatogbe e Newman (2004)
$l_{ef,panedpojman}$	Comprimento efetivo de flambagem proposto por Panedpojman, Thepchatri e Limkatanyu (2014)

$l_{ef,V15}$	Comprimento efetivo de flambagem proposto por Vieira (2015)
\bar{l}_o	Comprimento efetivo proposto por Shamass e Guarracino (2020)
p	Passo dos alvéolos
p_e	Tensão crítica de compressão para formulação da BS5950-1:2000
t_f	Espessura da mesa do perfil
t_w	Espessura da alma do perfil
y_a	Distância do centroide do Tê até a face superior/inferior do alvéolo
y_b	Distância do centroide do Tê até a face superior/inferior do perfil
y_o	Distância entre o centroide do Tê e o centroide do perfil alveolar
$y_{p,celular}$	Distância do ponto de formação de rótula plástica à linha média do montante
C_1, C_2	Parâmetro adimensional para cálculo de $V_{Rk,V14}$
D_o	Diâmetro do alvéolo para perfil celular
E	Módulo de elasticidade do aço
Imp	Imperfeição geométrica inicial
K	Coeficiente de flambagem
\dot{K}	Coeficiente de ajuste para cálculo de $\lambda_{Justino}$
Q_c	Carga crítica de flambagem proposta por Shamass e Guarracino (2020)
V_{cr}	Força cortante crítica proposta por Delesques (1969)
V_e	Força cortante resistente ao escoamento do montante de alma
$V_{v,p,Valente}$	Força cortante de plastificação proposta por Valente (2018)
$V_{p,anglo}$	Força cortante de plastificação para padrão Anglo-Saxão proposto por Vieira (2015)
$V_{p,Justino}$	Força cortante de plastificação proposta por Justino <i>et al.</i> (2018)
$V_{p,Litzka}$	Força cortante de plastificação para padrão Litzka proposto por Vieira (2015)
$V_{r,exp}$	Força cortante obtida experimentalmente
V_{Rm}	Força cortante média
$V_{v,l}$	Força cortante de plastificação proposta por Lawson, Oshatogbe e Newman (2004)
$V_{v,p}$	Força cortante de plastificação proposta Grilo <i>et al.</i> (2018)

$V_{v,t}$	Força cortante de plastificação proposta por Tsavdaridis e D’Mello (2011)
α	Fator adimensional para cálculo de ϕ_{EN} , ϕ_J e η
α'	Ângulo do lado inclinado do alvéolo do perfil castelado, ângulo de inclinação da barra comprimida no modelo de Shamass e Guarracino (2020)
β_G	Fator de ajuste para cálculo de $V_{h,p}$
β_v	Fator de ajuste para cálculo de $V_{h,p,Valente}$
ξ	Coeficiente para o cálculo de Q_c
γ_o	Coeficiente de ajuste para cálculo de V_{Rk} de Vieira (2015)
η	Coeficiente adimensional para cálculo de ϕ_B
λ	Índice de esbeltez
$\lambda_{Justino}$	Índice de esbeltez proposta por Justino
$\lambda_{0,B}$	Parâmetro de esbeltez para o cálculo de η
$\bar{\lambda}$	Índice de esbeltez reduzida
λ_o	Índice de esbeltez reduzida proposta por Valente
$\lambda_{0,fi}$	Índice de esbeltez reduzida em situação de incêndio
$\lambda_{p,anglo}$	Limite de esbeltez, em que ocorre a plastificação para padrão anglo-saxão
$\lambda_{p,Litzka}$	Limite de esbeltez, em que ocorre a plastificação para padrão Litzka
$\lambda_{r,anglo}$	Limite de esbeltez, em que ocorre a flambagem elástica para padrão anglo-saxão
$\lambda_{r,Litzka}$	Limite de esbeltez, em que ocorre a flambagem elástica para padrão Litzka
ρ	Relação b_w/p
ϕ_B	Coeficiente adimensional para cálculo de χ_B
ϕ_{EN}	Coeficiente adimensional para cálculo de χ_{EN}
ϕ_J	Coeficiente adimensional para cálculo de χ_J
χ	Fator de redução associado à compressão
χ_B	Fator de redução associado à compressão pela BS5950-1:2000
$\chi_{cr,anglo}$	Fator de força crítica de flambagem elástica para padrão Anglo-Saxão
$\chi_{cr,Litzka}$	Fator de força crítica de flambagem elástica para padrão Litzka
χ_{EN}	Fator de redução associado à compressão pela EN 1993-1-1:2005
χ_G	Fator de redução associado à compressão proposto por Grilo
$\chi_{inel,Anglo}$	Fator de força cortante de flambagem inelástica para padrão Anglo-Saxão

$\chi_{inel,Litzka}$	Fator de força cortante de flambagem inelástica para padrão Litzka
χ_J	Fator de redução associado à compressão proposta por Justino
χ_r	Fator de força crítica de flambagem elástica no ponto de transição do regime inelástico e elástico
χ_v	Fator de redução associado à compressão proposta por Valente
χ_{V15}	Fator de redução associado à compressão proposta por Vieira (2015)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações iniciais	12
1.2	Objetivos	16
1.3	Estrutura da dissertação.....	17
2	ARTIGO 1 – Simulação numérica da flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis alveolares de diferentes padrões	18
2.1	Introdução	18
2.2	Fundamentação experimental e numérica	22
2.2.1	Investigações experimentais sobre FMAV	22
2.2.2	Estratégias de modelagem numérica	25
2.3	Desenvolvimento do modelo numérico	27
2.3.1	Modelo constitutivo para o aço	28
2.3.2	Propriedades geométricas.....	29
2.3.3	Procedimento de análise numérica	30
2.3.4	Condições de contorno, malha e imperfeições geométricas iniciais	30
2.4	Resultados e discussão	31
2.5	Conclusões.....	33
	Referências	34
3	ARTIGO 2 – Análise comparativa de modelos analíticos para predição da capacidade resistente à flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis castelados	38
3.1	Introdução	38
3.2	Modelos analíticos para força cortante resistente à FMAV	42
3.2.1	Modelo analítico de Delesques (1969).....	42
3.2.2	Modificações de Sakiyama (2018) no modelo de Delesques (1969).....	43
3.2.3	Modelo analítico de Vieira (2015).....	44
3.2.4	Modelo analítico de Wang <i>et al.</i> (2016).....	46
3.2.5	Modelo analítico de Justino <i>et al.</i> (2020).....	47
3.2.6	Modelo analítico de Valente (2018).....	49
3.3	Descrição do modelo numérico	52
3.3.1	Estudo de variação de parâmetros.....	53
3.4	Resultados e discussão	54

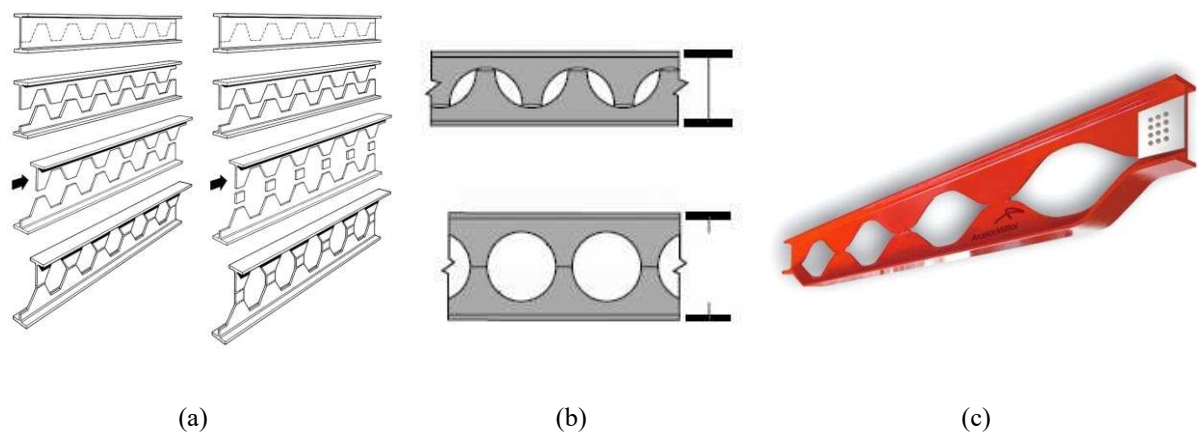
3.5	Modelo característico e de cálculo	59
3.6	Conclusões.....	61
	Referências	62
4	ARTIGO 3 – Análise comparativa de modelos analíticos para predição da capacidade resistente à flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis celulares.....	65
4.1	Introdução	65
4.2	Modelos analíticos para força cortante resistente à FMAV	68
4.2.1	Modelo analítico de Delesques (1969)	68
4.2.2	Modificações de Verissimo <i>et al.</i> (2013) no modelo de Delesques (1969).....	69
4.2.3	Modelo analítico de Lawson, Oshatogbe e Newman (2004)	69
4.2.4	Modificações de Vieira (2014) no modelo de Lawson, Oshatogbe e Newman (2004)	70
4.2.5	Modelo analítico de Tsavdaridis e D'Mello (2011)	71
4.2.6	Modelo analítico de Panedpojman; Thepchatri; Limkatanyu (2014)	72
4.2.7	Modelo analítico de Wang, Wang e Liu (2014).....	73
4.2.8	Modelo analítico de Grilo <i>et al.</i> (2018).....	73
4.2.9	Modelo de Shamass e Federico Guarracino (2020).....	75
4.3	Descrição da modelagem numérica e estudo de variação de parâmetros	76
4.3.1	Descrição do modelo numérico	76
4.3.2	Estudo de variação de parâmetros.....	78
4.4	Resultados e discussão	79
4.5	Ajuste estatísticos no modelo de Grilo <i>et al.</i> (2018)	82
4.6	Modelo característico e de cálculo	87
4.7	Conclusões.....	89
	Referências	89
5	CONCLUSÕES	93
5.1	Conclusões gerais.....	93
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	95
	REFERÊNCIAS.....	95
	ANEXO 1 – Série de perfis VCS (Viga Celular Soldada).....	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Perfis alveolares são perfis de aço com aberturas regulares na alma, obtidos a partir de perfis I, projetados para aumentar a altura da seção e, assim, elevar a inércia, a rigidez e a capacidade resistente à flexão (Grilo *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2025). Na Figura 1, são apresentados alguns tipos de perfis alveolares.

Figura 1 – Algumas tipologias de perfis alveolares (a) perfis castelados; (b) perfis celulares; (c) perfis Angelina.



Fonte: (a) Grünbauer ([s. d.]) (b) e (c) Vieira (2011a).

De modo geral, esses perfis são fabricados cortando-se um perfil de alma cheia, deslocando as metades de um certo comprimento e, por fim, soldando-se os montantes de alma, como mostrado na Figura 1a (Vieira, 2014; Wang *et al.*, 2016). Com a evolução das tecnologias de corte e soldagem, tornou-se possível a produção de perfis alveolares com diferentes padrões geométricos de alvéolos, associados a elevados níveis de precisão, qualidade e viabilidade econômica, ampliando as possibilidades de sua aplicação (Brinkhus, 2015; Oliveira, 2012; Sakiyama, 2018).

A estratégia de aumentar a rigidez à flexão por meio do corte e reposicionamento de perfis de aço foi empregada pela primeira vez em 1910 pelas empresas Chicago Bridge e Iron Works (Ferreira; Martins; De Nardin, 2020). Na década de 1930, perfis castelados com até 12 metros de comprimento foram utilizados pela Empresa Skoda para construção de uma fábrica em Doudlevec (Ferrari, 2013). Em 1935, Geoffrey Boyd aplicou esse conceito para vencer maiores

vãos sem aumentar o consumo de aço em um edifício industrial na Argentina (Ferreira; Martins; De Nardin, 2020; Oliveira, 2012; Sakiyama, 2018).

Inicialmente, a fabricação manual favorecia o uso de alvéolos hexagonais, originando os chamados perfis castelados, denominação associada à semelhança do corte com as ameias de castelos medievais (Oliveira, 2012). Entre esses perfis, destacam-se três padrões clássicos de corte – Anglo-saxão, Litzka e Peiner – que diferem essencialmente pelo formato do hexágono (Brinkhus, 2015; Gonçalves, 2015).

Com o avanço dos processos de corte automatizado, novas tipologias passaram a ser desenvolvidas. Na década de 1990, Peter Walker, em parceria com a Empresa Wescol Structures Limited, introduziu os perfis alveolares com alvéolos circulares, conhecidos como perfis celulares (Grilo, 2018). Posteriormente, em 2007, Claude Vasconi, em colaboração com a ArcelorMittal, desenvolveu o perfil Angelina, caracterizado por alvéolos de geometria senoidal combinada com trechos retos (Grilo, 2018).

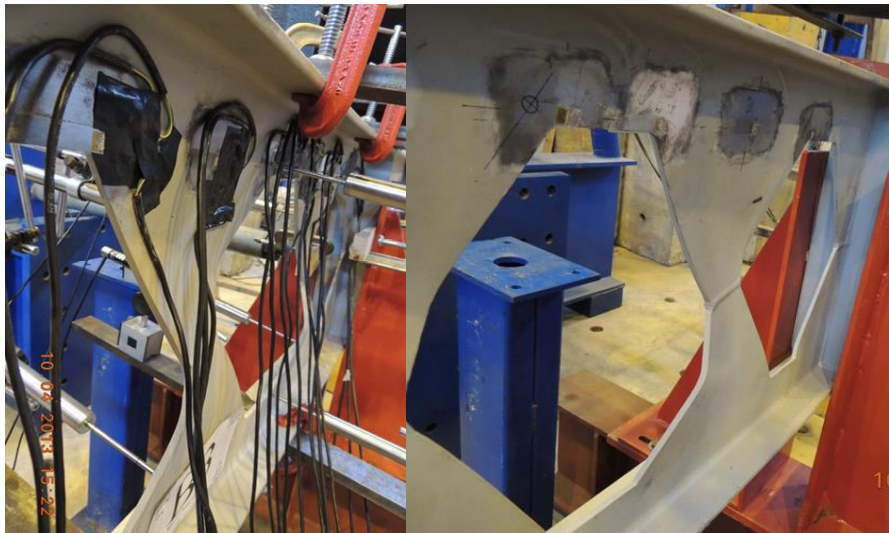
Os perfis alveolares são empregados em função de suas vantagens estruturais, construtivas e estéticas, destacando-se a possibilidade de integração das instalações prediais à estrutura, o que otimiza o espaço interno e permite a redução da altura entre pavimentos. Esses perfis também apresentam elevada capacidade de vencer maiores vãos quando comparados a perfis de alma cheia de mesmo peso, possibilitando a redução do número de pilares e fundações e, conseqüentemente, a diminuição de custos da construção. Como resultado dessas características, observa-se ainda a redução de até 30% do peso total da estrutura. Adicionalmente, os perfis alveolares apresentam elevada versatilidade, sendo aplicáveis em reforços e requalificações de edificações existentes, podendo ser fabricados com eixo curvo, o que favorece soluções em sistemas de cobertura e drenagem. Em geral, esses perfis apresentam rendimento estrutural superior ao de perfis de alma cheia e, com o avanço dos processos de automação, observam-se ganhos em precisão e qualidade de fabricação, aliados à redução de custos, tornando esse sistema competitivo do ponto de vista técnico e econômico (Ferreira, Martins e De Nardin, 2020; Grilo, 2018; Menkulasi *et al.*, 2017; Miranda *et al.*, 2023; Oliveira, 2012; Santos *et al.*, 2025).

A presença de alvéolos sequenciais na alma do perfil altera a distribuição de tensões e as propriedades geométricas da seção do elemento, resultando em modos de falhas distintos daqueles observados em perfis de alma cheia, embora alguns sejam semelhantes. Entre os

principais modos de falha associados às vigas alveolares destacam-se a formação de mecanismo plástico, a flambagem lateral com torção, a flambagem do montante de alma por cisalhamento, a flambagem do montante de alma por compressão, o escoamento do montante de alma por tensões combinadas e o escoamento do montante de alma na junta soldada.

A flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV), foco desse trabalho, é um modo de falha relacionado à ação do esforço cortante, que induz a distorção do montante de alma, estabelecendo um campo de tensões diagonais com uma diagonal comprimida e outra tracionada. A diagonal tracionada atua na estabilização no ponto central da diagonal comprimida, que pode flambar em duas ondas, originando o padrão de deformação ilustrado na Figura 2. Esse modo de falha ocorre com maior frequência em perfis com almas esbeltas, nos quais a concentração de tensões no montante de alma provoca instabilidade na borda comprimida do montante.

Figura 2 - Flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV)



Fonte: Vieira (2015).

A flambagem do montante de alma por cisalhamento tem sido amplamente investigada por meio de estudos experimentais e numéricos. Diversos ensaios realizados em perfis alveolares evidenciaram a ocorrência da FMAV como modo de falha relevante, permitindo a identificação dos padrões de deformação e dos principais parâmetros geométricos associados ao fenômeno (Bazile e Texier, 1968; Delesques, 1969; Grilo *et al.*, 2018; Panedpojaman, Thepchatr, Limkatanyu, 2014; Redwood e Demirdjian, 1998; Sakiyama, 2018; Tsavdaridis e D’Mello, 2011; Vieira, 2015; Zaarour e Redwood, 1996).

Com o avanço das ferramentas computacionais, a modelagem numérica ampliou e fortaleceu a análise da FMAV. De modo geral, três estratégias principais são adotadas na literatura: a modelagem do perfil completo, a modelagem de uma parte representativa do perfil e a modelagem isolada de um único montante de alma. A modelagem do perfil completo é empregada por representar fielmente o perfil alveolar (Durif, Bouchaïr e Vassart, 2013; Erdal e Saka, 2013; Ferrari, 2013; Gonçalves, 2015; Grilo *et al.*, 2018; Najafi e Wang, 2017; Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu, 2014; Redwood e Demirdjian, 1998; Sakiyama, 2018; Santos *et al.*, 2025; Valente, 2018; Vieira, 2014, 2011, 2015; Wang, Wang, Liu, 2014).

Por outro lado, a modelagem de um único montante de alma tem se mostrado adequada para o estudo da FMAV, pois isola o fenômeno, elimina os efeitos de borda e apresenta baixo custo computacional, sendo indicada para estudos de variações de parâmetros abrangentes (Saternus, 2022; Shamass e Guarracino, 2020). Essa estratégia de modelagem foi utilizada em estudos de variação de parâmetros em estudos mais recentes (Grilo *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2020; Lawson, Oshatogbe, Newman, 2004; Miranda *et al.*, 2023; Panedpojaman, Thepchatri, Limkatanyu, 2014; Pereira, 2022; Tsavdaridis e D’Mello, 2011; Vieira, 2015).

Diversos estudos propuseram modelos analíticos para a estimativa da resistência à FMAV em perfis alveolares, tendo por base resultados experimentais e numéricos, contemplando diferentes tipologias e geometrias de alvéolos (Delesques, 1968, 1969; Grilo *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2020; Lawson, Oshatogbe, Newman, 2004; Panedpojaman, Thepchatri, Limkatanyu, 2014; Shamass e Guarracino, 2020; Tsavdaridis e D’Mello, 2011; Valente, 2018; Vieira, 2014, 2015; Wang *et al.*, 2016; Wang, Wang, Liu, 2014). De modo geral, essas formulações foram calibradas com base em estudos de variação de parâmetros restritos, usualmente limitados a conjuntos específicos de perfis, faixas reduzidas de dimensões geométricas e número moderado de simulações, o que suscita dúvidas quanto à sua adequação diante de investigações de variação de parâmetros mais abrangentes.

Apesar dos avanços obtidos por meio de estudos experimentais, numéricos e analíticos, ainda existem lacunas importantes na literatura sobre o fenômeno da FMAV. No campo da modelagem numérica, não há consenso quanto às estratégias mais adequadas para a análise da FMAV, especialmente no que se refere às condições de contorno e à definição de imperfeições geométricas iniciais na modelagem de um único montante de alma. Além disso, perfis castelados e celulares têm sido, em geral, analisados de forma independente, inexistindo uma abordagem unificada que contemple ambos os padrões. Essas limitações refletem-se também

nos modelos analíticos disponíveis, cujas previsões apresentam divergências entre si (Saternus, 2022; Shamass e Guarracino, 2020), não havendo até o momento estudos comparativos abrangentes que avaliem o desempenho dessas expressões, permanecendo incerto quais modelos são capazes de prever de forma confiável e segura a resistência à FMAV em perfis alveolares.

Para suprir essas lacunas foram compilados resultados experimentais, estratégias de modelagem numérica e modelos analíticos disponíveis na literatura. Investigou-se uma abordagem unificada baseada em diferentes estratégias de modelagem de um único montante de alma da literatura, permitindo a identificação da estratégia mais adequada em termos de precisão e custo computacional. Adicionalmente, foi desenvolvido um estudo de variação de parâmetros abrangente, totalizando 6328 simulações numéricas, a partir do qual foram avaliados os principais modelos analíticos existentes, identificando-se o mais adequado para perfis castelados e propondo modificações em um modelo para perfis celulares, com vistas à melhoria da precisão.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar e recomendar os modelos analíticos que melhor representem o comportamento à FMAV em perfis alveolares de diferentes padrões.

Para atingir esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- realizar uma revisão da literatura sobre os resultados experimentais de perfis alveolares que apresentaram falha por FMAV, bem como sobre as estratégias de modelagem numérica e os principais modelos analíticos disponíveis para a predição da capacidade resistente associada a esse modo de falha;
- aprimorar um modelo baseado no Método dos Elementos Finitos para a representação do fenômeno de FMAV em perfis alveolares, considerando modelos previamente desenvolvidos;
- desenvolver um abrangente estudo de variação de parâmetros, de modo a contemplar a faixa de variação geométrica dos perfis utilizados no contexto brasileiro, para perfis alveolares de diferentes padrões;
- realizar uma análise comparativa entre os principais modelos analíticos disponíveis na literatura para a determinação da força cortante resistente associada à FMAV em perfis

alveolares de diferentes padrões, propondo, quando cabível, aprimoramentos dos modelos avaliados.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por capítulos, iniciando-se com uma introdução geral do tema. Em seguida, são apresentados três capítulos elaborados no formato de artigos científicos, finalizando-se com um capítulo dedicado às conclusões gerais do estudo.

O segundo capítulo corresponde a um artigo sobre calibração de um modelo numérico para perfis alveolares submetidos à FMAV, sendo estruturado em resumo, introdução, fundamentação experimental e numérica, desenvolvimento do modelo numérico, resultados e discussão, conclusões e referências.

O terceiro capítulo apresenta um artigo voltado à análise de modelos analíticos para a predição da capacidade resistente à FMAV em perfis castelados, organizado em resumo, introdução, modelos analíticos para força cortante resistente à FMAV, descrição do modelo numérico, resultado e discussão, conclusões e referências.

O quarto capítulo consiste em um artigo dedicado à avaliação de modelos analíticos para a predição da capacidade resistente à FMAV em perfis celulares, estruturado em resumo, introdução, modelos analíticos para força cortante resistente à FMAV, descrição do modelo numérico, resultado e discussão, ajustes estatísticos no modelo de Grilo, conclusões e referências.

O capítulo final reúne as considerações gerais sobre o tema e as conclusões globais do trabalho.

2 ARTIGO 1 – Simulação numérica da flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis alveolares de diferentes padrões

Resumo

Perfis alveolares são elementos estruturais de aço com aberturas regulares, sendo mais comuns os formatos hexagonais (castelados) e circulares (celulares). Devido às aberturas sequenciais, quando submetidos a esforços cortantes, esses perfis podem apresentar o fenômeno da flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV), fenômeno investigado neste trabalho. Embora diversas pesquisas experimentais tenham sido realizadas nas últimas seis décadas, ainda não há na literatura uma compilação das propriedades geométricas, mecânicas e de capacidades últimas de perfis que falharam por FMAV. Além disso, estudos numéricos têm adotado diferentes estratégias de modelagem, seja do perfil completo ou de um único montante de alma, este último, sem consenso quanto à metodologia de modelagem e sem análises conjuntas de perfis castelados e celulares. Para suprir essas lacunas, foi realizada uma revisão com 69 resultados experimentais, dos quais 32 (23 castelados e 9 celulares) foram selecionados para a calibração unificada ao modelo numérico representativo de um único montante de alma. Foram testadas 50 estratégias de modelagem, totalizando 1600 modelos numéricos, com variação de condições de contorno, característica da malha e imperfeições geométricas iniciais. Dentre as 50 estratégias de modelagens avaliadas, 5 apresentaram desempenho estatisticamente mais consistente, com coeficiente de variação inferior a 10%, sendo recomendadas para investigações relacionadas ao fenômeno. O estudo contribui ao consolidar uma metodologia unificada para a avaliação numérica da FMAV em perfis castelados e celulares e recomenda, para trabalhos futuros, sua aplicação em geometrias alternativas de alvéolos.

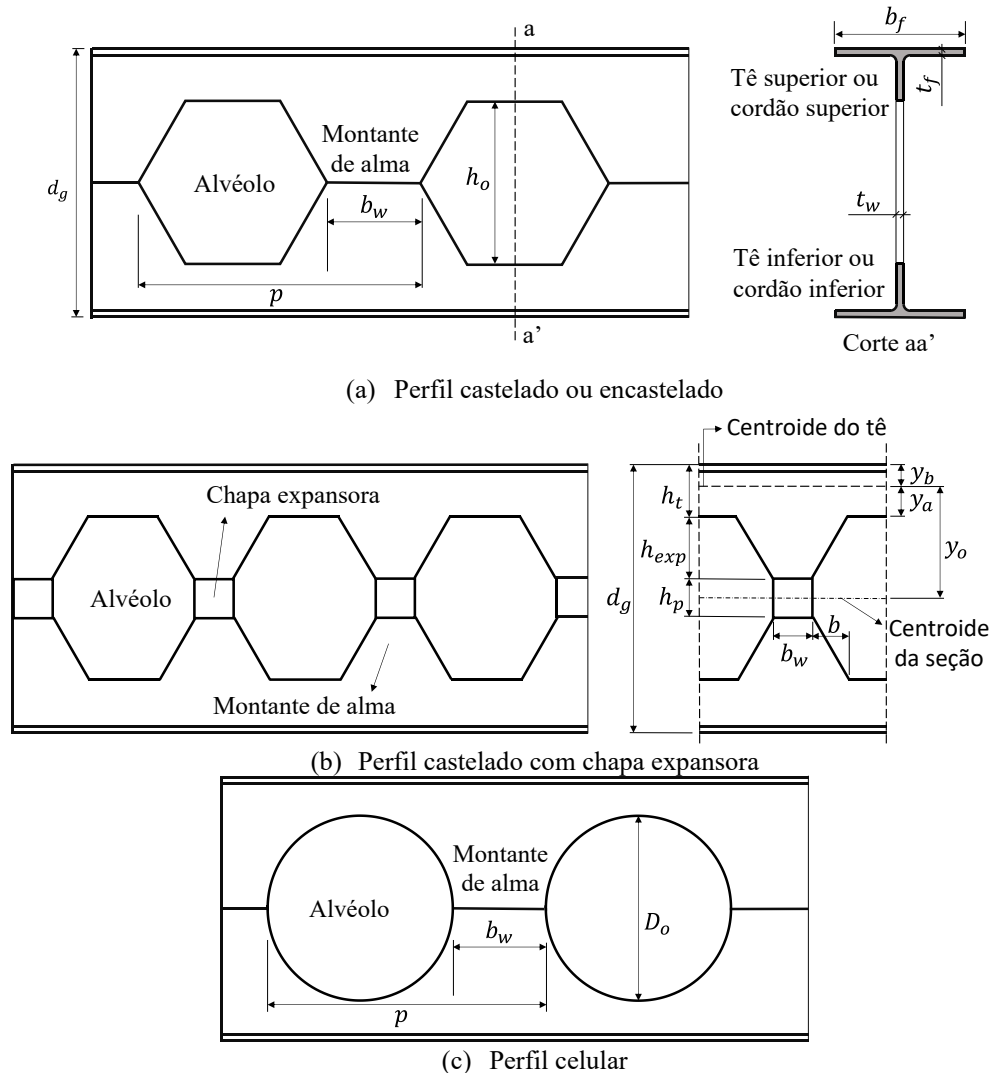
Palavras-chave: Perfis alveolares, perfis castelados, perfis celulares, flambagem do montante de alma, força cortante, simulação numérica.

2.1 Introdução

Os perfis alveolares são elementos estruturais de aço com aberturas regulares e sequenciais na alma, obtidas a partir do corte de um perfil laminado ou soldado com um formato geométrico definido, seguido da translação longitudinal das metades em um certo comprimento e da posterior soldagem das duas metades (Lawson *et al.*, 2006; Wang; Wang; Liu, 2014). Essa técnica tem como principal finalidade aumentar a rigidez à flexão sem adição de material (Oliveira, 2012; Tsavdaridis; D’Mello, 2012). Os alvéolos podem apresentar diversas formas

geométricas e espaçamentos entre as aberturas, sendo os formatos hexagonal e circular os mais empregados. Os perfis com aberturas hexagonais ou octogonais são conhecidos como perfis castelados (ver Figura 3-a), enquanto aqueles com aberturas circulares são conhecidos como celulares (ver Figura 3-c) (Grilo *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2020).

Figura 3 – Tipos e nomenclatura para perfis alveolares.



Fonte: adaptado de Veríssimo *et al.* (2013).

Os perfis alveolares são empregados desde os anos 1930 (Lubke, 2017) e, com os avanços da tecnologia de corte e soldagem, tornou-se viável a fabricação de perfis alveolares com custo competitivo (Ferreira; Martins; De Nardin, 2020; Oliveira, 2012; Redwood; Zaarour; Megharief, 1996). Paralelamente, o desenvolvimento de aços com maior resistência e confiabilidade possibilitou a produção de seções mais esbeltas em comparação aos perfis disponíveis originalmente (Melcher *et al.*, 2004). Como consequência, os perfis modernos são mais suscetíveis a instabilidades, evidenciando a necessidade de investigações mais aprofundadas sobre os modos de falha em perfis alveolares.

Os modos de falha observados nos perfis alveolares são diferentes dos modos observados nos perfis de alma cheia, em virtude das descontinuidades introduzidas pelos alvéolos. Um dos modos de falha possíveis aos perfis alveolares é a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV).

A FMAV é um modo de falha possível quando o montante de alma de um perfil alveolar é submetido a um esforço cortante. O esforço cortante causa a distorção do montante de alma, criando duas diagonais de esforços, uma tracionada e outra comprimida. A diagonal tracionada tende a estabilizar o centro do montante de alma, enquanto a diagonal comprimida tende a sofrer o fenômeno de instabilidade em duas ondas (Vieira, 2015), como ilustrado na Figura 4.

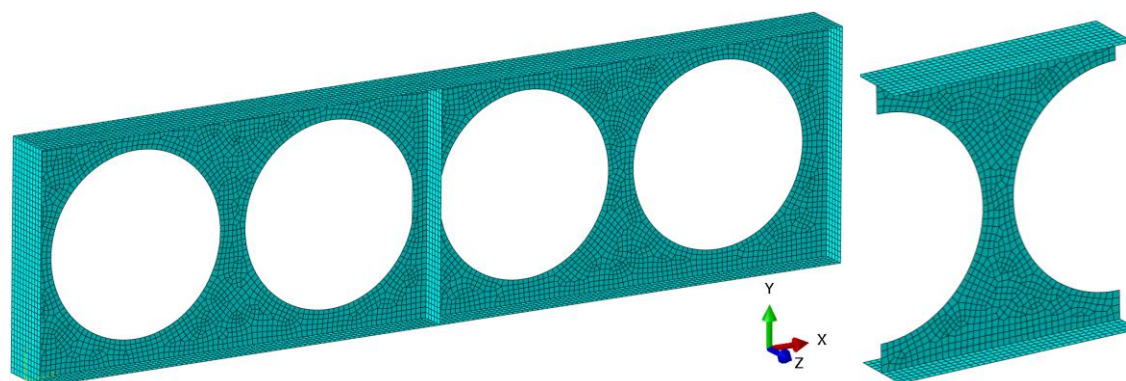
Figura 4 – Flambagem do montante de alma por cisalhamento ocorrida em ensaio.



Foto: Gustavo Veríssimo.

Diversos autores investigaram a FMAV por meio de modelagens numéricas com métodos de elementos finitos (MEF) (Grilo *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2020; Lawson *et al.*, 2006, 2011; Lawson; Oshatogbe; Newman, 2004; Miranda *et al.*, 2023; Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu, 2014; Santos *et al.*, 2025; Tsavdaridis; D’Mello, 2011; Valente, 2018; Vieira, 2014, 2011, 2015; Ward, 1990). Nesses estudos foram adotadas duas abordagens principais: a modelagem do perfil completo (Figura 5a) e a modelagem de um único montante de alma (Figura 5b).

Figura 5 - Estratégias de modelagem numérica para FMAV.



(a) Perfil completo.

(b) Único Montante de alma.

Em alguns desses estudos, optou-se pelo modelo de um único montante de alma, uma vez que a capacidade resistente à FMAV independe do vão e essa abordagem é mais eficiente computacionalmente do que a modelagem do perfil completo. Esses modelos apresentaram boa concordância com resultados experimentais, mas ainda não há consenso na literatura quanto à metodologia de modelagem. Foram propostas diferentes condições de contorno, tipo e tamanho de elemento finito e imperfeição geométrica inicial. Adicionalmente, os perfis castelados e celulares têm sido analisados separadamente, não havendo até o momento uma abordagem unificada que contemple ambos em uma mesma análise numérica. Esses fatores dificultam a definição de uma estratégia de modelagem de referência, visto que ainda não há consenso quanto à abordagem que melhor represente a FMAV em perfis castelados e celulares.

Diversos estudos experimentais com perfis alveolares de diversos padrões foram conduzidos nas últimas seis décadas. Contudo, não há na literatura uma síntese que consolide os parâmetros geométricos, mecânicos e os resultados experimentais de perfis que apresentaram FMAV. Ademais, parte desses estudos incluem perfis que falharam por outros mecanismos, o que dificulta a identificação e a comparação direta dos casos que apresentaram FMAV. Essa ausência de uma revisão integrada representa outra lacuna importante, sobretudo diante do uso crescente de modelagens numéricas baseadas em resultados experimentais (Ferreira; Martins; De Nardin, 2020; Miranda *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo calibrar um modelo numérico de um único montante de alma aplicável tanto a perfis castelados quanto a celulares, permitindo que a simulação numérica seja conduzida independentemente do formato dos alvéolos. Para isso, inicialmente realizou-se um levantamento e compilação dos estudos experimentais disponíveis na literatura que reportaram falhas por FMAV em perfis alveolares, compilando suas

geometrias e suas respectivas capacidades resistentes. A partir desses resultados, foi realizada uma análise comparativa das metodologias de modelagem via MEF propostas por diferentes autores, considerando diferentes estratégias para representação das imperfeições geométricas iniciais, das condições de contorno e das características da malha de elementos finitos. Essa análise comparativa permitiu identificar as estratégias de modelagem que melhor representam o comportamento observado experimentalmente, permitindo a sistematização de uma metodologia unificada de modelagem numérica para representação do fenômeno de FMAV em perfis alveolares de diversos padrões.

Além de ampliar a compreensão sobre os mecanismos de FMAV em perfis alveolares, a calibração de um modelo numérico robusto e validado contribui para reduzir a dependência de ensaios experimentais de alto custo, viabilizar estudos de variação de parâmetros em larga escala e subsidiar o aprimoramento de critérios de dimensionamento e recomendações normativas. Dessa forma, o modelo proposto representa uma ferramenta confiável e eficiente para previsão do comportamento estrutural de perfis alveolares submetidos à FMAV.

2.2 Fundamentação experimental e numérica

Nesta seção é apresentada uma revisão de literatura sobre estudos experimentais e numéricos de perfis alveolares submetidos à FMAV. Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos em ensaios laboratoriais reportados na literatura, com destaque para os parâmetros geométricos analisados e para a resistência última dos perfis. Em seguida, são discutidos os modelos numéricos propostos por diferentes autores, com ênfase nas estratégias de modelagem adotadas e nos métodos de análise empregados.

2.2.1 Investigações experimentais sobre FMAV

Neste tópico são apresentados os resultados experimentais encontrados na literatura sobre perfis alveolares que apresentaram modo de falha por FMAV. Os estudos foram organizados em dois grupos, correspondentes aos perfis castelados e celulares.

Bazile e Texier (1968) ensaiaram sete vigas biapoiadas com aplicação de oito forças pontuais, das quais cinco apresentaram FMAV. Delesques (1969) realizou sete ensaios com carregamento em três pontos, e Zaarour e Redwood (1996) conduziram doze ensaios com a mesma metodologia, com ocorrência de FMAV em dez deles. Redwood e Demirdjian (1998) executaram quatro ensaios variando apenas o comprimento das vigas. Vieira (2015) conduziu 14 ensaios em perfis castelados padrões Litzka e Anglo-Saxão, com e sem chapa expansora,

identificando FMAV em 13 deles. Sakiyama (2018) deu continuidade a esses estudos, totalizando 12 ensaios, sendo 10 com FMAV. As principais características geométricas dos perfis ensaiados por esses autores (ver Figura 3), bem como a resistência ao escoamento dos aços (f_y), as imperfeições geométricas iniciais medidas em laboratório (Imp) e o esforço cortante máximo obtido experimentalmente ($V_{r,exp}$) estão apresentados na Tabela 1.

No caso das vigas celulares, Tsavdaridis e D'Mello (2011) realizaram dois ensaios experimentais desse padrão e Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014) realizaram nove ensaios com diferentes geometrias. Mais recentemente, Grilo (2018) realizou catorze ensaios em perfis celulares, dos quais nove falharam por FMAV. As dimensões, resistência ao escoamento do aço (f_y) e as imperfeições geométricas iniciais medidas em laboratório (Imp) e o esforço cortante máximo obtido experimentalmente ($V_{r,exp}$) desses estudos encontram-se resumidos na Tabela 2.

Tabela 1 - Resumo de dados experimentais de perfis castelados disponíveis na literatura.

Ref.	Perfil	d_g (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h_o (mm)	b_w (mm)	p (mm)	h_p (mm)	f_y (MPa)	Imp	$V_{r,exp}$ (kN)
Bazile; Texier (1968)	A	500	300	17.5	10	300	168	504.0	0	370.0	*	402.5
	B	600	300	17.5	10	370	168	504.0	130	302.0	*	342.5
	C	700	300	17.5	10	500	168	504.0	200	315.0	*	300.0
	D	700	300	17.5	10	470	168	504.0	230	315.0	*	310.0
	E	500	135	10.2	6.6	320	138	414.0	140	336.0	*	140.0
Delesques (1969)	A	500	300	17.5	10	300	173.2	504	0	370	*	278.4
	B	600	300	17.5	10	370	138.6	504	65	302	*	194.4
	C	700	300	17.5	10	500	173.2	504	100	315	*	149.2
	D	700	300	17.5	10	470	138.6	504	115	315	*	129.3
	E	500	135	10.2	6.6	320	103.9	414	70	288	*	80.2
	F	500	135	10.2	6.6	320	103.9	504	70	335	*	97.6
	G	500	135	10.2	6.6	320	103.9	630	70	350	*	122.0
Zaarour; Redwood (1996)	8-2a	359.7	58.4	4.7	3.5	270.8	48.3	222.3	50.8	374.4	*	24.9
	8-4	358.9	58.4	4.7	3.5	270.0	58.7	342.9	50.8	374.4	*	19.8
	10-1	370.6	69.1	4.4	3.6	245.9	58.2	254.0	0	357.2	*	39.6
	10-2	417.8	69.9	4.0	3.6	295.1	57.7	254.0	50.8	357.2	*	29.4
	10-3	376.4	70.6	4.4	3.6	260.4	57.9	368.3	0	357.2	*	36.9
	10-4	425.5	70.6	4.3	3.7	308.1	58.9	368.3	50.8	357.2	*	25.1
	12-1	476.3	78.5	5.3	4.7	352.8	73.4	355.6	0	311.7	*	57.4
	12-2	527.8	78.0	5.4	4.6	403.9	74.4	355.6	50.8	311.7	*	49.2
	12-3	449.6	78.2	5.4	4.6	302.5	71.4	438.2	0	311.7	*	58.3
	12-4	501.7	78.0	5.3	4.7	349.8	68.3	438.2	50.8	311.7	*	46.7
Redwood; Demirdjian (1998)	10-5a	380.5	66.9	4.59	3.56	266.2	77.8	308	0	345.6	*	46.4
	10-5b	380.5	66.9	4.59	3.56	266.2	77.8	308	0	345.6	*	50.5
	10-6	380.5	66.9	4.59	3.56	266.2	77.8	308	0	345.6	*	47.4
	10-7	380.5	66.9	4.59	3.56	266.2	77.8	308	0	345.6	*	42.2
Vieira (2015)	A1	452.2	103.7	6.1	4.9	301	177.2	524.5	0	349	$d_g/52$	85.1
	B1	453.7	103.5	7.1	5.7	301	79.9	327.1	0	353.5	$d_g/300$	126.5
	B2	451.1	101.4	6.1	5.1	302	76.8	327.4	0	353.5	$d_g/207$	89.8
	B3	458.3	100.7	9.1	6.6	307	78.6	333.6	0	365	$d_g/74$	168.6
	B4	462	101.7	9.3	6.4	310	79.8	334	0	413	$d_g/278$	161.5
	B5	472.6	170.5	13.1	7.8	316	82.7	342.2	0	426	$d_g/94$	249.7
	B6	472.9	171.3	12.5	8	317	82.3	342.2	0	426	$d_g/135$	270.4
	C1	601.2	101.6	6	5.1	452	175.5	525.3	151	353.5	$d_g/35$	69.8
	C2	600.6	103	6.3	5.1	451	176.1	526.1	151	353.5	$d_g/22$	72.7
	C3	612.8	100.6	9.1	6.6	451	180.2	535.7	152	352.5	$d_g/819$	116.1
	C4	610.6	101.7	9.2	6.5	457	178.7	534.8	147	390.5	$d_g/168$	128.5
C5	623.6	171.5	12.4	8	466	183	551.4	146	432.5	$d_g/139$	195.3	
C6	623.4	170.2	13.1	7.9	467	183	550	150	432.5	$d_g/171$	194.7	
Sakiyama (2018)	SA2	450	125	6.43	4.69	300	173.2	519.6	0	373.08	$d_g/112$	94.4
	SB1	450	125	6.45	4.63	300	75	324	0	373.08	$d_g/53$	89.7
	SB2	450	125	6.45	4.64	300	75	324	0	373.08	$d_g/43$	93.9
	SB3	472.5	125	8.1	6.48	315	78.8	340.2	0	396.14	$d_g/57$	189.0
	SB4	472.5	125	8.05	6.43	315	78.8	340.2	0	396.14	$d_g/130$	183.9
	SB6	487.5	167	12.81	8.26	325	81.3	351	0	396.01	$d_g/131$	288.0
	SE1	675	150	8.15	4.73	450	112.5	486	0	373.08	$d_g/49$	93.9
	SE2	675	150	8.07	4.7	450	112.5	486	0	373.08	$d_g/43$	82.3
	SX1	840	170	8.24	4.71	560	140	604.8	0	373.08	$d_g/39$	98.9
	SX2	840	170	8.28	4.67	560	140	604.8	0	373.08	$d_g/35$	93.9

* Imperfeição geométrica inicial não informada

Tabela 2 - Resumo de dados experimentais de perfis celulares disponíveis na literatura.

Ref.	Perfil	d_g (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	D_o (mm)	b_w (mm)	p (mm)	f_y (MPa)	Imp	$V_{r,exp}$ (kN)
Grilo (2018)	A1	431,0	104,0	5,5	4,7	345,3	47,3	392,6	449,0	$d_g/86$	38,0
	A2	433,0	102,0	5,6	4,8	342,5	103,3	445,8	416,0	$d_g/173$	62,0
	A3	433,0	104,0	6,2	4,7	343,9	139,3	483,2	397,0	$d_g/108$	71,0
	A5	409,0	102,0	6,0	4,8	248,8	76,3	325,1	416,0	$d_g/51$	99,0
	A6	407,0	103,0	5,75	4,9	250,0	100,1	350,1	397,0	$d_g/108$	102,5
	B1	442,0	99,0	9,1	5,8	351,8	51,2	403,0	398,0	$d_g/221$	54,0
	B2	440,0	101,0	9,0	5,4	352,1	106,2	458,3	365,0	$d_g/147$	79,0
	B5	412,0	99,0	9,0	5,9	243,8	74,6	318,4	398,0	$d_g/57$	138,5
Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu (2014) ^a	NB1	449,8	152,0 ^b	10,9 ^b	7,6 ^b	315,0	95,0	410,0	375,3	*	144,0
	NB2	449,8	152,0 ^b	10,9 ^b	7,6 ^b	315,0	63,0	378,0	375,3	*	128,0
	NB3	581,0	140,0 ^b	9,4 ^b	7,0 ^b	375,0	86,0	461,0	392,0	*	94,0
	NB4	463,0	102,0 ^b	7,6 ^b	5,1 ^b	325,0	78,0	400,0	390,0	*	57,0
	NB5	558,0	180,0 ^b	13,5 ^b	8,6 ^b	358,0	122,0	480,0	300,0	*	268,0
	NB6	599,0	300,0 ^b	21,0 ^b	11,0 ^b	422,0	63,0	485,0	300,0	*	313,0
	NB7	600,0	180,0 ^b	13,5 ^b	8,6 ^b	430,0	55,0	485,0	300,0	*	132,0
	CB1	555,0	180,0 ^b	13,5 ^b	8,6 ^b	380,0	190,0	570,0	489,0	*	421,0
Tsavdaridis; D'Mello (2011) ^a	CB3	474,8	140,0 ^b	9,4 ^b	7,0 ^b	375,0	125,0	500,0	303,0	*	185,0
	A1	449,8	152,4 ^b	10,9 ^b	7,6 ^b	315,0	94,5	409,5	359,7	*	288,7
	B1	449,8	152,4 ^b	10,9 ^b	7,6 ^b	315,0	63,0	378,0	375,3	*	255,0

^a Não foram identificadas as dimensões reais do perfil, somente o nome do perfil utilizado.
^b dimensões estimadas pelo nome do perfil.
* imperfeição geométrica inicial não informada

2.2.2 Estratégias de modelagem numérica

Duas principais estratégias de modelagem numérica são encontradas na literatura para investigar o fenômeno de FMAV de perfis alveolares. A primeira corresponde à modelagem do perfil completo, utilizada tanto para a reprodução fiel de amostras experimentais quanto para estudos de variação de parâmetros. A segunda estratégia refere-se à modelagem de um único montante de alma, na qual apenas um montante de alma é representado, permitindo isolar o modo de falha por FMAV.

No caso da modelagem dos perfis completos, diversas pesquisas têm explorado essa abordagem ao longo das últimas décadas (Durif; Bouchaïr; Vassart, 2013; Erdal; Saka, 2013; Ferrari, 2013; Gonçalves, 2015; Grilo, 2018; Najafi; Wang, 2017; Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu, 2014; Redwood; Demirdjian, 1998; Sakiyama, 2018; Santos *et al.*, 2025; Valente, 2018; Vieira, 2014, 2011, 2015; Wang; Wang; Liu, 2014). Apesar da diversidade de investigações, a maioria desses trabalhos apresenta características comuns, destacando-se a adoção do modelo constitutivo bilinear para o aço e utilização de elementos finitos do tipo casca (*shell*).

Por sua vez, a modelagem de um único montante de alma tem se consolidado como uma alternativa eficiente em diferentes estudos (Grilo *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2020; Lawson;

Oshatogbe; Newman, 2004; Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu, 2014; Pereira, 2022; Tsavdaridis; D’Mello, 2011; Vieira, 2015). Essa abordagem apresenta vantagens relevantes em comparação à modelagem do perfil completo, como a capacidade de isolar o modo de falha por FMAV e a redução do custo computacional. Considerando esses aspectos, neste trabalho optou-se por investigar e calibrar modelos numéricos baseados na abordagem de um único montante de alma, buscando estabelecer uma metodologia que atenda aos perfis castelados e celulares em conjunto. Portanto, as análises apresentadas a seguir concentram-se exclusivamente nas informações encontradas na literatura referentes a essa estratégia de modelagem.

Embora existam diferenças entre as modelagens numéricas do perfil completo e de um único montante de alma, notou-se, na literatura, que todos os estudos baseados neste último também utilizam o modelo constitutivo bilinear para o aço e elementos finitos do tipo casca. As pesquisas que propõem estratégias de modelagem numérica de um único montante de alma para simular o comportamento de perfis submetidos ao FMAV apresentam variações nos parâmetros adotados, tais como: tipo e tamanho dos elementos finitos, imperfeição geométrica inicial e condições de contorno. Ressalta-se que, em todos os casos, os parâmetros de modelagem foram ajustados com base nos resultados experimentais específicos utilizados por cada autor em sua calibração, o que implicou em abordagens particularizadas e limitadas a um único tipo de perfil alveolar (castelado ou celular).

No que diz respeito ao tipo e tamanho dos elementos finitos, observa-se uma tendência bastante uniforme entre os trabalhos analisados. Na maioria dos estudos foram adotados elementos de casca de quatro nós, com ou sem integração reduzida (S4 ou S4R), sendo identificado apenas um caso de utilização de elementos de casca de oito nós com integração reduzida (S8R). Quanto ao tamanho da malha, embora existam variações, os elementos tendem a ter valores entre 5 e 20 mm. Em relação à imperfeição geométrica inicial, observa-se uma divergência considerável entre os estudos, que adotam desde valores prescritos geometricamente, como $d_g/100$, até valores proporcionais à imperfeição aferida em laboratório, da ordem de 4% dessa medição. Os parâmetros adotados por cada autor estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Informações de modelagens numéricas disponíveis na literatura.

Autor	Tipo de elemento	Tamanho do elemento	Imperfeição inicial
Grilo <i>et al.</i> (2018)	S4	5 mm ou $b_w/10$	4% real
Justino <i>et al.</i> (2020)	S8R	10 mm	$d_g/100$
Lawson; Oshatogbe; Newman (2004)	S4*	$b_w/10^a$	$d_g/500$
Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu (2014)	S4*	$d_g/15$ ou $b_w/4$	$d_g/500$
Tsavdaridis; D'Mello (2011)	S4*	20 mm	$t_w/200$
Vieira (2015)	S4R	5 mm	$d_g/100$

*Não é informado se é utilizado integração reduzida
^a São utilizados tamanhos de elementos diferentes dependendo das dimensões do perfil

Como a modelagem de um único montante de alma representa apenas uma parte do perfil alveolar, não é possível reproduzir diretamente as condições reais de apoio, razão pela qual se observa uma grande variação das condições de contorno propostas por diferentes autores. Em muitos casos a solicitação de cisalhamento é introduzida no modelo numérico como uma força distribuída aplicada na alma direita do perfil, em conjunto com as condições de apoio definidas. As diferenças das condições de contorno propostas por cada autor são apresentadas na Tabela 4 enquanto as direções principais são apresentadas na Figura 5b.

Tabela 4 - Condições de contorno de modelos de um único montante de alma disponíveis na literatura.

Autor	Condição de Contorno	ux	uy	uz	rx	ry	rz
Grilo <i>et al.</i> (2018)	Alma Esq		X	X	X		
	Mesa Esq				X	X	
	Alma Dir						
	Mesa Dir	X		X			X
Justino <i>et al.</i> (2020)	Alma Esq	X	X	X	X		
	Mesa Esq	X	X		X	X	
	Alma Dir			X	X		
	Mesa Dir				X	X	
Lawson; Oshatogbe; Newman (2004)	Alma Esq		X	X	X	X	
	Mesa Esq	X		X	X		X
	Alma Dir			X	X	X	
	Mesa Dir	X		X	X		X
Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu (2014) e Tsavdaridis; D'Mello (2011)	Alma Esq	X	X	X	X	X	
	Mesa Esq	X		X	X		X
	Alma Dir			X	X	X	X
	Mesa Dir			X	X	X	X
Vieira (2015)	Alma Esq		X	X	X		
	Mesa Esq				X	X	
	Alma Dir	X					X
	Mesa Dir						

X – Restringido

u representa a translação e r representa a rotação em torno dos eixos

2.3 Desenvolvimento do modelo numérico

Neste item é apresentado o desenvolvimento do modelo numérico de um único montante de alma elaborado no software Abaqus, considerando o modo de falha por FMAV. Para isso, foram

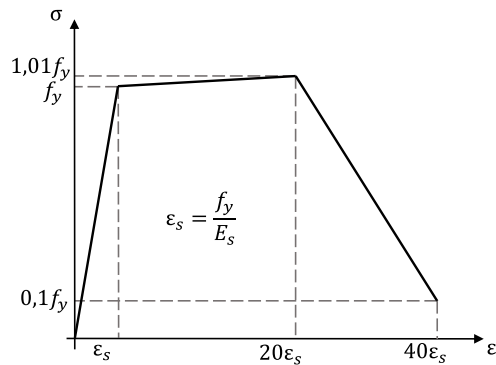
selecionados, como base experimental para calibração, os estudos de Vieira (2015), Grilo *et al.* (2018) e Sakiyama (2018), previamente descritos no Item 2.2.1. Esses trabalhos foram escolhidos por representarem as investigações mais recentes e por disponibilizarem um conjunto de dados experimentais completo, com informações detalhadas de geometria, imperfeição geométrica inicial, propriedades do material e cargas últimas, essenciais para o processo de calibração do modelo proposto.

No total, foram considerados 32 resultados experimentais, sendo 23 referentes a perfis castelados e 9 a perfis celulares, de modo que a calibração realizada contempla simultaneamente esses dois tipos de perfis alveolares.

2.3.1 Modelo constitutivo para o aço

Embora todos os autores utilizem o modelo Bilinear, verificou-se que, quando a ruptura não é explicitamente definida no Abaqus, a análise numérica pode não apresentar capacidade última por resistência máxima. Nessas situações, observa-se apenas uma queda considerável de rigidez, enquanto a carga máxima e o deslocamento continuam aumentando para valores irrealistas. Para contornar essa situação, testou-se uma abordagem com modelo constitutivo Trilinear, que incorpora, além do regime elástico e elastoplástico, uma reta pós-pico destinada a induzir a ruptura no software, representando a redução da resistência do material com o aumento da deformação. Durante a parametrização dessa reta, constatou-se que quedas abruptas geram inconsistências na solução numérica, enquanto uma transição mais suave fornece resultados estáveis. A inclusão da reta pós-pico mantém a queda de rigidez e fornece uma capacidade última semelhante à observada no modelo Bilinear. No entanto, no Trilinear, a capacidade última é sempre definida pela resistência máxima, o que nem sempre ocorre no modelo Bilinear. Essa característica é desejável em análises implementadas via script. O modelo constitutivo ajustado para a análise da FMAV, utilizando a modelagem de um único montante de alma, é apresentado na Figura 6. Ressalta-se que, embora não represente fielmente o modelo constitutivo do material, o modelo proposto reproduz satisfatoriamente os resultados experimentais para este tipo de análise numérica.

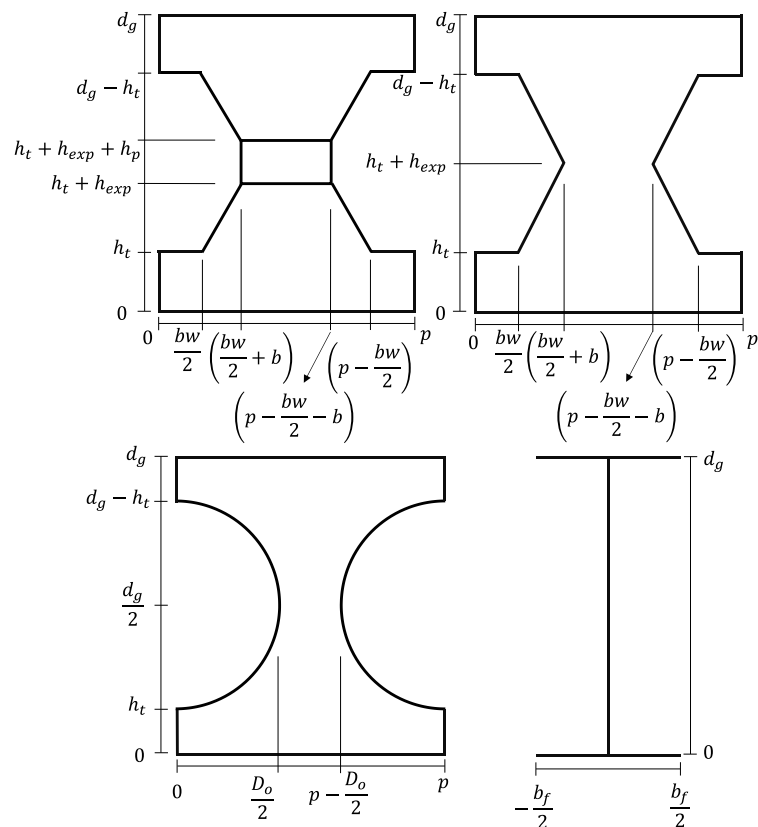
Figura 6 - Modelo constitutivo Trilinear.



2.3.2 Propriedades geométricas

A modelagem numérica foi realizada a partir das dimensões geométricas obtidas experimentalmente, apresentadas na Tabela 1 para os perfis castelados e na Tabela 2 para os perfis celulares. Com intuito de padronizar a definição das variáveis geométricas e facilitar a reprodução dos modelos, as dimensões de um único montante de alma consideradas na análise são representadas no sistema de coordenadas mostrado na Figura 7. Essa padronização, além de permitir uma melhor organização na construção dos modelos numéricos, também contribui para a reprodutibilidade em estudos futuros que venham a utilizar os mesmos perfis.

Figura 7 - Dimensões do modelo de um único montante de alma.



2.3.3 Procedimento de análise numérica

A análise numérica foi conduzida em duas etapas. Na primeira, realizou-se uma análise elástica de flambagem, da qual foram extraídos quatro modos de instabilidade. Adotou-se o modo associado ao menor autovalor positivo, por representar a condição crítica mais provável do sistema e, portanto, mais adequado para a definição da imperfeição inicial. Análises preliminares confirmaram que esse modo correspondeu à flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV). Na segunda etapa, desenvolveu-se a análise não linear pelo método de Riks, com a consideração da não linearidade geométrica e a implementação da imperfeição inicial obtida no passo anterior, o que possibilitou a determinação da resistência máxima.

2.3.4 Condições de contorno, malha e imperfeições geométricas iniciais

Foram avaliadas todas as condições de contorno identificadas na literatura, previamente descritas na Tabela 4, com o objetivo de realizar uma análise comparativa da influência das restrições impostas no modelo sobre a capacidade resistente. A solicitação de cisalhamento foi representada por uma força distribuída uniformemente na alma direita do perfil.

Para a discretização em elementos finitos, empregaram-se elementos de casca do tipo S4, S4R e S8R. O tamanho da malha foi definido por valores nominais variando entre 5 mm e 20 mm ou por equações específicas, que limitam o tamanho da malha do modelo conforme as dimensões do perfil. Essas informações estão apresentadas na Tabela 5.

As imperfeições geométricas iniciais foram introduzidas com diferentes magnitudes, utilizando as imperfeições propostas encontradas na literatura (Tabela 3) e ampliando o estudo com novas variações de imperfeições. Dessa forma, variaram-se as imperfeições com valores medidos experimentalmente (real), $t_w/200$, e valores entre $d_g/3125$ e $d_g/100$, sendo este último o adotado por Grilo *et al.* (2018) em seu estudo de variação de parâmetros.

Em síntese, o modelo constitutivo do aço e os procedimentos de análise numérica foram mantidos fixos ao longo do processo de calibração de um único montante de alma, enquanto as demais configurações foram ajustadas conforme os dados experimentais e numéricos apresentados no decorrer do artigo. No total, investigou-se a FMAV em 50 grupos com diferentes estratégias de modelagens, considerando as variações explicadas acima, com 33 perfis em cada grupo, totalizando 1600 simulações numéricas.

2.4 Resultados e discussão

Os resultados das análises numéricas, considerando as variações das condições de contorno, das características da malha de elementos finitos e da imperfeição geométrica inicial, estão sintetizados na Tabela 5. Nesta tabela também são apresentados os indicadores estatísticos de desempenho do modelo, incluindo a média da razão entre a força máxima obtida numericamente e a força máxima experimental, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). A avaliação desses resultados permite verificar a precisão do modelo numérico frente aos dados experimentais.

Para alguns modelos dos grupos G e V, a análise foi interrompida prematuramente, em função da ocorrência de incrementos muito pequenos, o que impediu o registro da força máxima. No entanto, observou-se que os incrementos imediatamente anteriores exibiam valores de força muito próximos aos do passo em que a análise foi interrompida, indicando tendência de estabilização da resposta. Dessa forma, o último incremento convergente foi considerado representativo da carga máxima obtida nessas análises.

Os grupos V, P e T apresentaram os desempenhos menos satisfatórios em relação à média dos resultados numéricos sobre o experimental. O grupo V tendeu a subestimar a capacidade resistente do perfil à FMAV, enquanto os grupos P e T superestimaram essa capacidade. Por outro lado, alguns resultados do grupo F e do grupo J tiveram os melhores resultados nesse parâmetro. O grupo G, embora com valores ligeiramente subestimados, também apresentou médias consistentes dentro do conjunto de análises.

Na análise da dispersão dos resultados, a partir do desvio padrão, verificou-se que a maioria dos testes apresentou valores próximos de 12%. No entanto, alguns grupos J se destacaram por registrar dispersões inferiores, em torno de 9%.

Ao considerar conjuntamente a média e o coeficiente de variação, os modelos J1, J3, J4, J6 e J7 se destacam pelos melhores resultados, enquanto os modelos J8, L4 e G3 podem ser classificados como de desempenho razoável. Embora os cinco primeiros possuam médias e coeficientes de variação semelhantes, eles se diferenciam significativamente quanto ao tempo médio de análise por perfil, como mostra a Tabela 6. Os tempos de processamento mostrados na Tabela 6 foram obtidos com um processador i9-13900K rodando a 3.0 GHz, dedicando-se os 8 núcleos de performance dos 24 núcleos físicos do processador para o modelo numérico.

Tabela 5 - Parâmetros de modelagem e estatísticas de calibração.

ID	Condição de Contorno	Tipo de elemento	Tamanho de elemento (mm)	Imperfeição geométrica inicial	Média	Desv. Padrão (%)	CV (%)
G1	Grilo <i>et al.</i> (2018)	S4	10	$d_g/3125$	0,95	12,5	13,1
G2		S4	10	4% Real	0,94	12,8	13,6
G3		S4	5 ou $b_w/10$	$d_g/3125$	0,93	11,4	12,2
G4		S4	5 ou $b_w/10$	4% Real	0,93	12,2	13,2
G5		S4R	10	$d_g/3125$	0,95	12,6	13,3
G6		S4R	10	4% Real	0,94	12,7	13,4
G7		S4R	5 ou $b_w/10$	$d_g/3125$	0,93	11,5	12,3
G8		S4R	5 ou $b_w/10$	4% Real	0,93	11,9	12,8
J1	Justino <i>et al.</i> (2020)	S4	5	$d_g/100$	0,99	9,1	9,3
J2		S4	10	Real	0,99	13,8	14,8
J3		S4	10 ou $d_g/40$ ou $b_w/5$	$d_g/100$	1,00	9,5	9,5
J4		S4R	5	$d_g/100$	0,99	9,1	9,3
J5		S4R	10	Real	0,99	13,7	13,9
J6		S4R	10 ou $d_g/40$ ou $b_w/5$	$d_g/100$	1,00	9,5	9,5
J7		S8R	5	$d_g/100$	0,99	9,3	9,4
J8		S8R	10 ou $d_g/40$ ou $b_w/5$	$d_g/100$	1,01	10,4	10,3
L1	Lawson; Oshatogbe; Newman (2004)	S4	5	$d_g/100$	0,86	10,8	12,6
L2		S4	5	$d_g/500$	1,00	12,9	12,9
L3		S4	10	$d_g/100$	0,90	13,6	15,1
L4		S4	10	$d_g/500$	1,02	12,8	12,6
L5		S4	10	real	0,93	17,7	19,1
L6		S4R	5	$d_g/100$	0,85	10,9	12,8
L7		S4R	5	$d_g/500$	1,00	12,8	12,8
L8		S4R	10	$d_g/100$	0,88	13,9	15,8
L9		S4R	10	$d_g/500$	1,02	13,0	12,8
L10		S4R	10	real	0,90	18,0	19,9
P1	Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu (2014)	S4	5	$d_g/500$	1,20	10,7	8,9
P2		S4	10	$d_g/500$	1,22	11,5	9,4
P3		S4	$d_g/15$ ou $b_w/4$	$d_g/500$	1,28	12,2	9,6
P4		S4	$d_g/15$ ou $b_w/4$	Real	1,14	14,8	13,0
P5		S4R	5	$d_g/500$	1,19	10,8	9,0
P6		S4R	10	$d_g/500$	1,22	11,5	9,4
P7		S4R	$d_g/15$ ou $b_w/4$	$d_g/500$	1,26	12,2	9,7
P8		S4R	$d_g/15$ ou $b_w/4$	Real	1,12	14,6	13,1
T1	Tsavdaridis; D' Mello (2011)	S4	5	$t_w/200$	1,25	11,2	9,0
T2		S4	10	Real	1,09	14,4	13,2
T3		S4	10	$t_w/200$	1,30	13,0	10,0
T4		S4	20	$t_w/200$	1,35	13,4	9,9
T5		S4R	5	$t_w/200$	1,25	11,2	8,9
T6		S4R	10	Real	1,09	14,3	13,2
T7		S4R	10	$t_w/200$	1,30	13,7	10,5
T8		S4R	20	$t_w/200$	1,34	13,5	10,0
V1	Vieira (2015)	S4	5	$d_g/100$	0,93	13,6	18,5
V2		S4	5	Real	0,73	15,0	20,6
V3		S4	10	$d_g/100$	0,84	15,2	18,1
V4		S4	10	Real	0,84	15,2	18,1
V5		S4R	5	$d_g/100$	0,74	13,8	18,6
V6		S4R	5	Real	0,73	14,4	19,7
V7		S4R	10	$d_g/100$	0,84	14,0	16,6
V8		S4R	10	Real	0,84	15,0	17,8

Real = Imperfeição geométrica medida em laboratório

Nota: Havendo mais de um valor, adota-se o menor.

Tabela 6 - Tempo de análise grupos J1, J3, J4, J6 e J7

Grupo	Tempo médio por perfil	Tempo total de análise
J1	00:03:43	01:58:56
J3	00:01:22	00:43:44
J4	00:02:50	01:30:40
J6	00:01:08	00:36:16
J7	00:09:11	04:53:52

Nessa perspectiva, quando a prioridade é o desempenho computacional, o modelo J6 mostra-se o mais eficiente. Por outro lado, o modelo J4 é mais indicado quando se busca uma resposta mais precisa.

Outro aspecto relevante a ser destacado é que elementos de ordem superior, como o S8R, não necessariamente representam de forma mais precisa o comportamento estrutural do que os elementos de ordem reduzida, como o S4R. No presente estudo, ambos apresentaram, no grupo J, médias próximas e satisfatórias. Contudo, os elementos S4R resultaram em coeficientes de variação ligeiramente menores que os elementos S8R, além disso, demandaram menor custo computacional.

Um ponto interessante a ser destacado é que é melhor adotar imperfeições geométricas fixas (como $d_g/100$) do que imperfeições geométricas medidas em laboratório. Isso acontece, pois nem sempre a imperfeição medida em laboratório corresponde à imperfeição do modo de flambagem com menor autovalor positivo obtido na análise de flambagem. Além disso, a diagonal tracionada tende a estabilizar o montante de alma, podendo reduzir a imperfeição inicial no centro do perfil antes de induzir a FMAV.

2.5 Conclusões

Neste trabalho, foi realizada a calibração de um modelo numérico de um único montante de alma no software ABAQUS, aplicável tanto a perfis castelados quanto a celulares, permitindo que a simulação numérica seja conduzida independentemente do formato dos alvéolos. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura focada em análises experimentais e numéricas. Dessa revisão, foram compilados 69 resultados experimentais de perfis de aço alveolares que apresentaram modo de falha por FMAV, sendo 49 castelados e 20 celulares, e foram apresentadas 6 metodologias de modelagem numérica de um único montante de alma propostas na literatura, contemplando diferentes condições de contorno, tipo e tamanho da malha e imperfeição geométrica inicial.

Na etapa de calibração do modelo numérico, foram selecionados 32 resultados experimentais obtidos na literatura, a partir dos quais se avaliaram 50 estratégias de modelagem, totalizando 1600 modelos numéricos. Cinco estratégias apresentaram respostas consistentes e satisfatórias, diferenciando-se principalmente pelo custo computacional. Quando a prioridade é o desempenho computacional, recomenda-se a utilização do modelo J6, enquanto o modelo J4 é mais indicado quando se busca uma precisão um pouco maior. Em ambas as estratégias foram adotadas as condições de contorno propostas por Justino *et al.* (2020), elementos S4R e imperfeição geométrica inicial de $d_g/100$. A diferença entre os grupos está apenas no tamanho dos elementos finitos. Para o grupo J6 foi utilizado o menor valor entre 10 mm, $d_g/40$ ou $b_w/5$, enquanto para o grupo J4 adotou-se 5 mm.

Verificou-se ainda que o modelo constitutivo Trilinear para o aço apresentou desempenho equivalente ao Bilinear, com a vantagem de permitir a definição da capacidade última do elemento estrutural pela carga máxima. Essa estratégia de modelagem numérica é particularmente relevante em análises automatizadas via script.

De forma geral, este estudo contribuiu para a consolidação de uma abordagem unificada para perfis castelados e celulares, indicando metodologias de modelagem numérica em elementos finitos de um único montante de alma adequadas para a investigação da FMAV, conciliando precisão e eficiência computacional. Essa calibração reduz a dependência de ensaios experimentais de alto custo, viabiliza a execução de estudos de variação de parâmetros e fornece subsídios técnicos para o aprimoramento de equações de dimensionamento. Assim, o modelo desenvolvido representa uma ferramenta eficiente e confiável para previsão do comportamento estrutural de perfis alveolares submetidos à FMAV.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se aplicar a modelagem de um único montante de alma e as metodologias de modelagem propostas na investigação da FMAV em perfis com diferentes geometrias de alvéolos.

Referências

- BAZILE, A.; TEXIER, J. *Essais de Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 3, no 3, p. 12–25, 1968.
- DELESQUES, R. Le *Calcul des Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 41–51, 1969.

- DURIF, S.; BOUCHAÏR, A.; VASSART, O. *Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 82, p. 72–87, 2013.
- ERDAL, F.; SAKA, M. P. *Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 80, p. 355–368, 2013.
- FERRARI, G. de A. *Simulação Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Alveolares Mistas de Aço e Concreto*. 2013. Master's thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3789>.
- FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. *Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 172, p. 106182, 2020.
- GONÇALVES, A. B. *Modelo analítico para dimensionamento de vigas alveolares mistas de aço e concreto*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6500>.
- GRILO, L. F. *et al. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 148, p. 525–541, 2018.
- GRILO, L. F. *Formulação para Determinação da Força Cortante Resistente de Flambagem do Montante de Alma em Vigas Celulares de Aço*. 2018. PhD Thesis - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUOS-B32NVX>.
- JUSTINO, L. G. *et al. Shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams in fire*. Engineering Structures, [s. l.], vol. 209, p. 109960, 2020.
- LAWSON, R. M. *et al. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 62, no 6, p. 614–629, 2006.
- LAWSON, Robert. M. *et al. Design of Composite Beams with Large Web Openings: In Accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*. Ascot: The Steel Construction Institute, 2011.
- LAWSON, R. M.; OSHATOGBE, D.; NEWMAN, G. M. *Design of FABSEC Cellular Beams in Non-Composite and Composite Applications: For Both Normal Temperature and Fire Engineering Conditions to SCI AD 269*. Leeds: [s. d.], 2004. Disponível em: Acesso em: 10 set. 2025.
- LUBKE, G. P. *Dimensionamento Otimizado de Vigas Alveolares de Aço*. 2017. Master's Thesis - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_11049 DISSERTA%C7%C3O%20GABRIELA%20LUBKE.pdf.
- MELCHER, J. *et al. Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 60, no 3–5, p. 795–808, 2004.

- MIRANDA, L. G. J. *et al.* **Comparative analysis of fire-adapted models for the shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams.** Fire Safety Journal, [s. l.], vol. 138, p. 103796, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711223000644>.
- NAJAFI, M.; WANG, Y. C. **Behaviour and design of steel members with web openings under combined bending, shear and compression.** Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 128, p. 579–600, 2017.
- OLIVEIRA, L. B. de. **Procedimentos para Definição das Características Geométricas de Vigas Alveolares de Aço para Sistemas de Piso e de Cobertura.** 2012. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3777>.
- PANEDPOJAMAN, P.; THEPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. **Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams.** Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 76, p. 92–104, 2014.
- PEREIRA, C. L. **Simulação computacional do comportamento estrutural de vigas celulares mistas de aço e concreto com perfil monossimétrico.** 2022. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/29857>.
- REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. **Castellated Beam Web Buckling in Shear.** Journal of Structural Engineering, [s. l.], vol. 124, no 10, p. 1202–1207, 1998.
- REDWOOD, R.; ZAAROUR, W.; MEGHARIEF, J. **Web Post Buckling in Castellated Beams.** In: ADVANCES IN STEEL STRUCTURES (ICASS '96). [S. l.]: Elsevier, 1996. p. 67–71.
- SAKIYAMA, E. K. H. **Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento em Vigas Casteladas Soldadas.** 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/20940>.
- SANTOS, E. V. *et al.* **Web-post buckling behaviour of composite beams with large elliptically-based web openings.** Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 229, p. 109483, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X25001610>.
- TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. **Optimisation of novel elliptically-based web opening shapes of perforated steel beams.** Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 76, p. 39–53, 2012.
- TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. **Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes.** Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 67, no 10, p. 1605–1620, 2011.
- VALENTE, M. T. **Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Casteladas de Aço em Situação de Incêndio com Ênfase nos Modos de Falha por Plastificação.** 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/24521>.

- VERÍSSIMO, G. de S. *et al.* **Estados limites aplicáveis às vigas alveolares de aço**. Revista da Estrutura de Aço. Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), [s. l.], vol. 2, no Volume 2. Número 2, p. 126–144, 2013.
- VIEIRA, H. C. **Análise Numérica da Flambagem do Montante de Alma devida ao Cisalhamento em Vigas de Aço Celulares**. 2014. Master's Thesis - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUOS-9MBHXF>.
- VIEIRA, W. B. **Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma em Vigas Casteladas de Aço**. 2015. PhD Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6741>.
- VIEIRA, W. B. **Simulação Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Casteladas de Aço com Ênfase na Flambagem do Montante De Alma**. 2011. MArter's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3744>.
- WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. **Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire**. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 85, p. 441–455, 2014.
- WARD, J. K. **Design of composite and non-composite cellular beams**. Reprinted 1994ed. Ascot: The Steel Construction Institute, 1990.
- ZAAROUR, W.; REDWOOD, R. **Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams**. Journal of Structural Engineering, [s. l.], vol. 122, no 8, p. 860–866, 1996. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281996%29122%3A8%28860%29>.

3 ARTIGO 2 – Análise comparativa de modelos analíticos para predição da capacidade resistente à flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis castelados

Resumo

Perfis castelados são empregados em estruturas de aço devido à sua elevada eficiência estrutural. No entanto, a presença das aberturas altera a distribuição de tensões e introduz modos de falha específicos, entre eles, a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV). Embora existam diversos modelos analíticos propostos para estimar a resistência à FMAV, não há na literatura uma definição clara sobre qual formulação apresenta desempenho consistente e confiável para perfis castelados. Nesse contexto, este trabalho investiga o desempenho dos principais modelos analíticos disponíveis para predição da resistência última à FMAV em perfis castelados. Para isso, foi conduzido um estudo de variação de parâmetros composto por 678 simulações numéricas, utilizando-se a série de perfis VCS, contemplando três padrões de corte: anglo-saxão, Litzka e Peiner. Os resultados numéricos foram confrontados com as previsões analíticas por meio de análises estatísticas de acordo com a EN 1990:2009. Os resultados evidenciam diferenças entre as estimativas fornecidas pelos modelos analisados e demonstram que o modelo proposto por Valente (2018) apresenta o melhor desempenho global na predição da resistência à FMAV em perfis castelados, embora tenda a superestimá-la levemente. Dessa forma, propôs-se a aplicação de um coeficiente redutor à equação original para obtenção de estimativas ligeiramente conservadoras. Assim, o estudo fornece subsídios técnicos para aplicações práticas de projeto e para o desenvolvimento de futuras normas e revisões normativas, ao identificar o modelo analítico mais confiável para a avaliação da FMAV em perfis castelados.

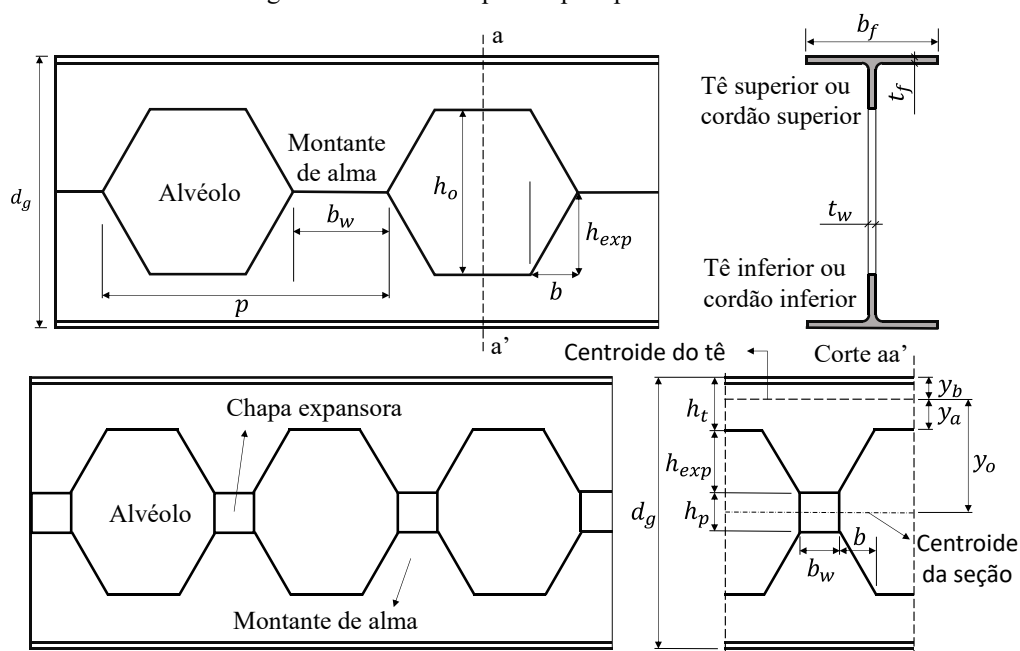
Palavras-chave: Perfis alveolares, estudo de variação de parâmetros, método dos elementos finitos, análise estatística, força cortante resistente.

3.1 Introdução

Perfis castelados são perfis de aço caracterizados por uma sequência regular de aberturas hexagonais ou octogonais, também referidas como alvéolos, cuja geometria padrão é apresentada na Figura 8. Em geral, são obtidos a partir do corte longitudinal em zigue-zague na alma de um perfil de alma cheia, seguido da translação das metades e da posterior união por solda (Miranda *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2016), podendo-se ainda inserir uma chapa expansora

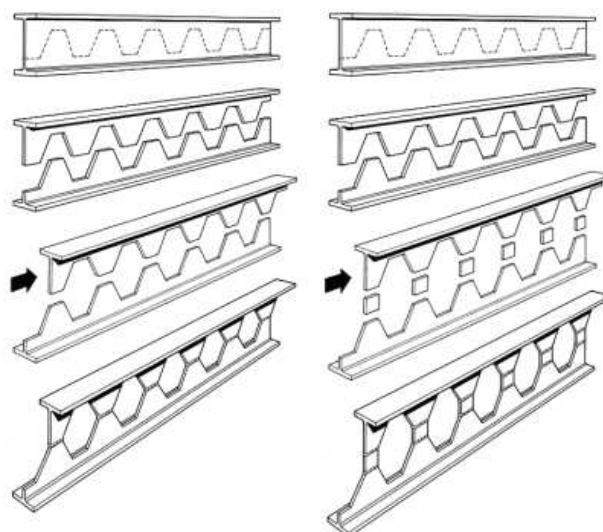
para aumentar a altura da seção (Figura 9). Entre as principais vantagens desses perfis destacam-se a redução do peso global da estrutura, integração das instalações prediais com a estrutura, redução do pé direito, aumento da rigidez à flexão sem acréscimo de aço e maior rendimento estrutural quando comparados aos perfis de alma cheia dos quais foram obtidos (Boyer, 1964; Menkulasi *et al.*, 2017; Miranda *et al.*, 2023; Oliveira, 2012; Sakiyama, 2018; Wang *et al.*, 2016). Com os avanços na automação industrial e nas técnicas de soldagem, tornou-se viável a produção de perfis alveolares com alta precisão e qualidade a custos competitivos, o que tem impulsionado sua crescente aplicação na prática estrutural (Menkulasi *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2025).

Figura 8 - Dimensões padrão para perfis castelados



Fonte: adaptado de Veríssimo *et al.* (2013).

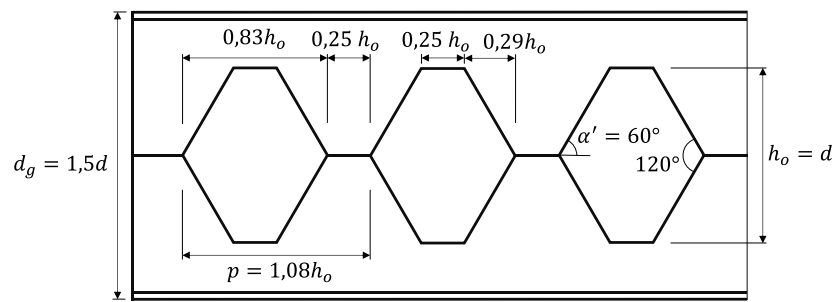
Figura 9 - Fabricação dos perfis castelados.



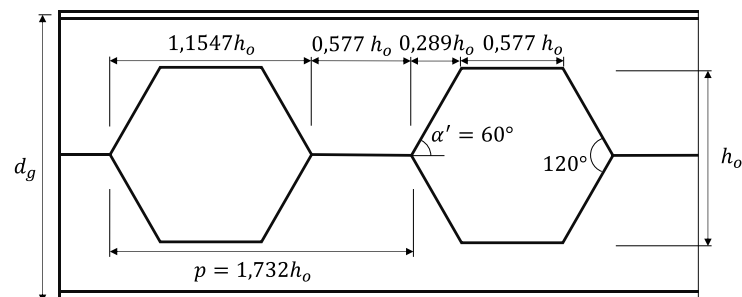
Fonte: Grünbauer ([s. d.])

Os perfis castelados podem ser produzidos com diferentes padrões de corte, entre os quais se destacam os padrões anglo-saxão, Litzka e Peiner. O padrão anglo-saxão, desenvolvido no Reino Unido, caracteriza-se por alvéolos com geometria mais alongada na direção vertical, cuja altura é igual à altura do perfil original (d), resultando em uma razão de expansão (d_g/d) fixa (Figura 10a). O padrão Litzka, proposto por Hubert Litzka, gera alvéolos hexagonais regulares, com lados de mesmo comprimento e passo definido como três vezes a largura do montante de alma (b_w) (Figura 10b). O padrão Peiner apresenta proporções de passo semelhantes às do padrão Litzka, porém com alvéolos hexagonais não regulares, já que a largura horizontal do alvéolo é igual à sua altura (Figura 10c) (Gonçalves, 2015; Sakiyama, 2018; Veríssimo *et al.*, 2013; Vieira, 2011, 2015).

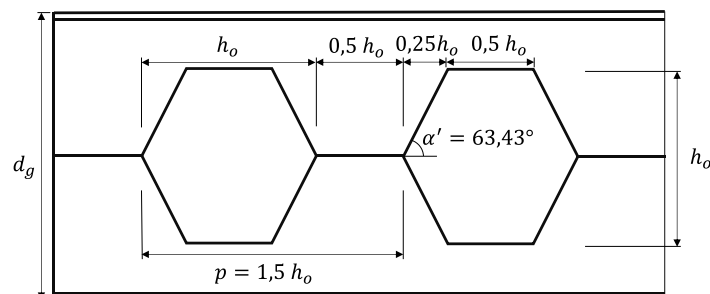
Figura 10 - Principais padrões de perfis castelados.



(a) Padrão Anglo-saxão



(b) Padrão Litzka



(c) Padrão Peiner

Fonte: Adaptado de Veríssimo *et al.* (2013).

A introdução de aberturas na alma de perfis de aço altera a distribuição de tensões na seção transversal, resultando em um comportamento estrutural distinto daquele observado em perfis de alma cheia. Essa alteração dá origem a novos mecanismos de falha, que devem ser investigados a fim de que se possa elaborar modelos representativos dos fenômenos envolvidos e capazes de possibilitar a verificação da segurança para efeito de projeto (Sae-Long *et al.*, 2025). Os principais modos de falha associados aos perfis alveolares são descritos por Kerdal; Nethercot (1984) e Gonçalves (2015). Dentre esses mecanismos, inclui-se a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV), que constitui o foco do presente trabalho.

A FMAV é um modo de falha associado à distorção do montante de alma sob a ação de esforços cortantes, resultando em um mecanismo de flambagem caracterizado pela formação de duas ondas, conforme ilustrado na Figura 11. Esse fenômeno tem sido objeto de investigações experimentais e numéricas, originando diversos modelos analíticos para a estimativa da resistência à FMAV em perfis castelados (Delesques, 1968, 1969; Justino, 2018; Justino *et al.*, 2020; Redwood e Demirdjian, 1998; Sakiyama, 2018; Valente, 2018; Veríssimo *et al.*, 2013; Vieira, 2015; Wang *et al.*, 2016). Estudos recentes indicam que os modelos analíticos para perfis celulares (aberturas circulares) apresentam discrepância entre si (Saternus, 2022; Shamass; Guarracino, 2020). Entretanto, ainda não há uma análise comparativa sistemática voltada especificamente a perfis castelados. Além disso, muitas formulações foram calibradas com base em estudos de variação de parâmetros restritos, geralmente limitados a conjuntos específicos de perfis, faixas reduzidas de dimensões geométricas e a um número moderado de simulações. Essas limitações revelam uma lacuna relevante no estado da arte, agravada pelo uso crescente de perfis alveolares, mantendo incerto o modelo analítico mais adequado para prever a resistência à FMAV em perfis castelados.

Figura 11 - Flambagem do montante de alma por cisalhamento.



Foto: Gustavo Veríssimo.

Visando suprir essas lacunas, neste trabalho foi realizada uma análise comparativa dos modelos analíticos de FMAV por meio de um estudo de variação de parâmetros abrangente, considerando variadas geometrias a partir do catálogo VCS (ArcelorMittal, 2025). Foram realizadas 678 simulações numéricas, distribuídas igualmente entre os padrões de corte anglo-saxão, Litzka e Peiner, permitindo avaliar o desempenho das formulações para cada padrão de corte e com uma ampla gama de geometrias, superando limitações dos estudos existentes. Os principais modelos analíticos disponíveis na literatura são reunidos e confrontados com os resultados numéricos obtidos, sendo a análise realizada com o apoio de procedimentos estatísticos da EN 1990:2009. Dessa forma, o trabalho investiga a capacidade preditiva desses modelos e identifica aquele que apresenta melhor aderência ao comportamento da FMAV em perfis castelados, contribuindo para o aprimoramento do estado da arte e para futuras aplicações em projeto estrutural.

3.2 Modelos analíticos para força cortante resistente à FMAV

Nesta seção é apresentada uma revisão da literatura sobre estudos que propuseram modelos analíticos para prever a força cortante resistente à FMAV.

3.2.1 Modelo analítico de Delesques (1969)

O francês Delesques foi um dos pioneiros na avaliação do FMAV (Vieira, 2015). O autor deduziu uma equação para a flambagem elástica do montante de alma, baseada num método de energia. No entanto, não se dispunha na época de recursos computacionais para simular a flambagem em regime inelástico. Não obstante, Delesques (1968) propõe equações para os trechos de flambagem inelástica e de plastificação da curva de FMAV.

No entanto, a expressão para calcular a força cortante crítica no montante alma do perfil alveolar era extensa, o que dificulta a aplicação tanto em normas técnicas quanto no dimensionamento desses elementos. Para superar essa limitação, o autor propôs uma nova equação, mais simples e levemente conservadora em relação à original (Delesques, 1969). Essa versão simplificada foi adotada em pesquisas recentes sobre rotinas e softwares para dimensionamento de perfis alveolares, como nos trabalhos de Brinkhus (2015) e Lubke (2017).

A força cortante crítica (V_{cr}) é calculada pela Equação (1):

$$V_{cr} = \frac{E \cdot t_w^3}{1,18 \cdot y_o} \left[1 + (1 - 2\rho) \left(1 - 0,8 \frac{h_{exp}}{y_o} - \frac{h_p}{y_o} \right) \right] \quad (1)$$

$$\text{Com: } \rho = \frac{b_w}{p}$$

Além da força cortante crítica, Delesques (1969) propôs uma expressão para o cálculo da força cortante resistente ao escoamento do montante de alma (V_e), formulada a partir da hipótese de uma distribuição elástica de tensões. A dedução apresentada pelo autor, bem como a expressão resultante, depende da altura da chapa expansora (h_p). O procedimento para obtenção de V_e é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Força cortante resistente ao escoamento do montante de alma

h_p (altura da chapa expansora)	V_e
$h_p \leq h_{exp} \cdot \frac{3\rho - 1}{1 - 2\rho}$	$t_w \cdot y_o \cdot p \cdot f_y \frac{(1 - \rho)^2}{3(h_p + h_{exp})}$
$h_{exp} \cdot \frac{3\rho - 1}{1 - 2\rho} \leq h_p \leq h_{exp} \cdot \frac{\rho}{1 - 2\rho}$	$t_w \cdot y_o \cdot p \cdot f_y \frac{4(1 - 2\rho) \left[\rho \cdot h_{exp} - \frac{(1 - 2\rho)h_p}{2} \right]}{3 h_{exp}^2}$
$h_p > h_{exp} \cdot \frac{\rho}{1 - 2\rho}$	$t_w \cdot y_o \cdot p \cdot f_y \frac{2\rho^2}{3h_p}$

Fonte: adaptado de Delesques (1968).

Com a força cortante crítica e a força cortante resistente ao escoamento do montante de alma, Delesques (1969) estima a força cortante média dos perfis castelados (V_{Rm}) por meio da Equação (2):

$$V_{Rm} \leq \begin{cases} \frac{2}{3} V_{cr} & \rightarrow V_{cr} \leq V_e \\ \frac{V_e + V_{cr}}{3} & \rightarrow V_e \leq V_{cr} \leq 2V_e \\ V_e & \rightarrow 2V_e \leq V_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

3.2.2 Modificações de Sakiyama (2018) no modelo de Delesques (1969)

Sakiyama (2018) conduziu 12 ensaios experimentais em vigas alveolares, onde 1 perfil Litzka e 9 anglo-saxões falharam por FMAV. Utilizando seus experimentos e os resultados experimentais de Vieira (2015), a autora propôs modificações no modelo analítico de Delesques (1969). A modificação proposta consiste na modificação dos limites e coeficientes da Equação (2), resultando na Equação (3).

$$V_{Rm} \leq \begin{cases} 1,8 V_{cr} & \rightarrow V_{cr} \leq 0,2V_e \\ \frac{0,8 V_e + 1,4 V_{cr}}{3} & \rightarrow 0,2 V_e \leq V_{cr} \leq 1,7 V_e \\ 1,06 V_e & \rightarrow 1,7 V_e \leq V_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

3.2.3 Modelo analítico de Vieira (2015)

Vieira (2015) investigou o fenômeno da FMAV em perfis castelados padrões anglo-saxões e Litzka experimentalmente e numericamente. Foram realizados 6 ensaios experimentais em perfis anglo-saxões e 8 ensaios em perfis padrão Litzka (sendo 6 com chapa expansora), e foram realizadas 234 simulações numéricas para cada padrão de corte. A partir dos resultados numéricos, Vieira (2015) propôs equações semiempíricas para diferentes imperfeições iniciais para prever a força cortante resistente à FMAV nesses perfis.

A abordagem escolhida por Vieira teve inspirações em modelos analíticos desenvolvidos anteriormente para perfis celulares (Lawson *et al.*, 2006; Panedpojaman; Thepchatr; Limkatanyu, 2014; Tsavdaridis; D’Mello, 2011), em que são calculados uma força cortante de plastificação e um fator de redução associado às instabilidades ocasionadas pela compressão.

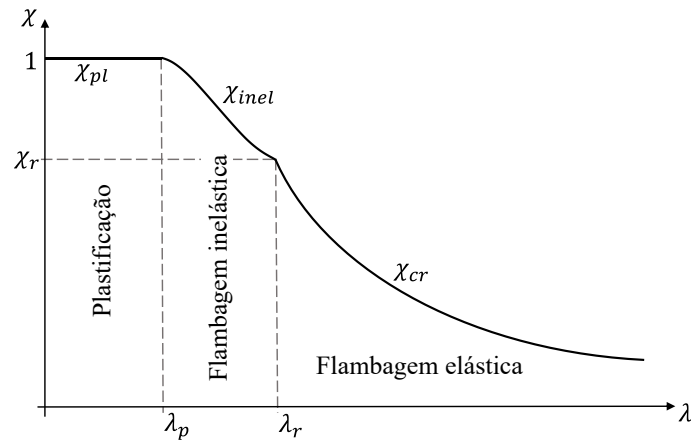
A força cortante resistente de plastificação proposta por Vieira (2015) é dada pelas Equações (4) e (5) para padrões Litzka ($V_{p,Litzka}$) e anglo-saxão ($V_{p,anglo}$), respectivamente:

$$V_{p,Litzka} = 1,609 \cdot b_w \cdot y_o \left(\frac{t_w}{p} \right)^{1,223} f_y \quad (4)$$

$$V_{p,anglo} = 2,422 \cdot b_w \cdot y_o \left(\frac{t_w}{p} \right)^{1,148} f_y \quad (5)$$

O fator de redução proposto por Vieira (2015) é obtido através de um conjunto de 3 curvas: a curva de plastificação, de flambagem elástica e uma intermediária entre as duas primeiras (flambagem inelástica), como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Modelo genérico da curva de flambagem do estudo de Vieira (2015).



A esbeltez do montante de alma (λ) é calculada pela Equação (6) com o comprimento de flambagem ($l_{ef,v15}$) calculado pela Equação (7).

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{l_{ef}\sqrt{12}}{t_w} \quad (6)$$

$$l_{ef,v15} = \frac{h_o + h_p}{h_o} \frac{\sqrt{b_w^2 + h_o^2}}{2} \quad (7)$$

Vieira (2015) propõe diferentes expressões para o cálculo dos limites entre as curvas de plastificação, de flambagem inelástica e flambagem elástica, considerando distintas imperfeições iniciais. O autor observou que os resultados numéricos obtidos com uma imperfeição igual a $d_g/100$ apresentam boa concordância com os resultados experimentais. Além disso, a tolerância de fabricação para as vigas alveolares, segundo a ArcelorMittal (apud Grilo *et al.*, 2018; Vieira, 2015), é igualmente de $d_g/100$, ou seja, a imperfeição inicial adotada nas análises numéricas reflete um valor realista em termos de desvios construtivos observados na prática. Dessa maneira, os limites entre as 3 curvas do fator de redução, considerando a imperfeição de $d_g/100$, são apresentados pelas Equações (10) e (11) para perfis Litzka e pelas Equações (12) e (13) para perfis anglo-saxões.

$$\lambda_{p,Litzka} = 241,12 - 6,5524 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (8)$$

$$\lambda_{r,Litzka} = -60,640 + 10,998 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (9)$$

$$\lambda_{p,anglo} = 108,06 - 3,3301 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (10)$$

$$\lambda_{r,anglo} = -17,150 + 8,508 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (11)$$

O fator de força cortante de flambagem elástica é dado pelas Equações (12) e (13), para os padrões Litzka ($\chi_{cr,Litzka}$) e anglo-saxão ($\chi_{cr,anglo}$), respectivamente.

$$\chi_{cr,Litzka} = 27,515 \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,947} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{1,830} \quad (12)$$

$$\chi_{cr,anglo} = 23,416 \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,883} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{1,825} \quad (13)$$

O fator de força cortante de flambagem inelástica proposto por Vieira (2015) é calculado a partir de uma interpolação linear para perfis Litzka e interpolação quadrática para perfis anglo-saxões, obtidos pelas Equações (14) e (15), respectivamente.

$$\chi_{inel,Litzka} = \frac{\lambda_r - \chi_r \cdot \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} - \frac{1 - \chi_r}{\lambda_r - \lambda_p} \lambda \quad (14)$$

$$\chi_{inel,anglo} = \chi_r + (1 - \chi_r) \left(\frac{\lambda_r - \lambda}{\lambda_r - \lambda_p}\right)^2 \quad (15)$$

onde χ_r é igual ao χ_{cr} obtido pelas Equações (12) ou (13) com $\lambda = \lambda_r$.

Dessa maneira, o coeficiente de redução (χ_{V15}) é obtido pela Equação (16).

$$\chi_{V15} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda \leq \lambda_p \\ \chi_{inel} & \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \chi_{cr} & \text{para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (16)$$

Por fim, a força cortante resistente à FMAV (V_{Rm}) pelo modelo de Vieira é calculada pela Equação (17).

$$V_{Rm} = \gamma_o \cdot \chi_{V15} \cdot V_p \quad (17)$$

sendo $\gamma_o = \begin{cases} 1,25 & \rightarrow \text{ para Padrão Litzka e Anglo-saxão} \\ 1,00 & \rightarrow \text{ para Padrão Litzka com chapa expansora} \end{cases}$

3.2.4 Modelo analítico de Wang *et al.* (2016)

Wang *et al.* (2016) realizaram um estudo numérico sobre o modo de falha por FMAV em perfis castelados. Para a calibração do modelo numérico, os autores utilizaram resultados experimentais disponíveis na literatura (Redwood; Demirdjian, 1998; Zaarour; Redwood, 1996). Após a calibração, compararam o modelo analítico proposto por Redwood; Demirdjian

(1998) com os resultados numéricos. Entretanto, observaram que a equação original, apresentada pela equação (18), não apresentava boa aderência aos valores numéricos obtidos. Essa expressão foi deduzida considerando a teoria de flambagem por cisalhamento de placas, servindo como base para o modelo.

$$V_{Rm} = k \left(\frac{2 y_o}{p} \right) \frac{E \cdot b_w \cdot t_w^3}{h_o^2} \quad (18)$$

Diante disso, Wang *et al.* (2016) propuseram uma adaptação no coeficiente k da formulação original. Em Redwood e Demirdjian (1998), esse coeficiente depende exclusivamente das razões geométricas h_o/b_w e b_w/t_w . Contudo, ao examinarem um conjunto mais amplo de geometrias, os autores identificaram que outras variáveis também influenciavam a resistência à FMAV, como h_o/t_w , h_t/t_w , h_o/b e até mesmo a própria espessura de alma (t_w).

Para incorporar esses efeitos, os autores redefiniram o cálculo do coeficiente k , apresentado pela Equação (19). Nesse procedimento, os coeficientes k_1 , k_2 , k_3 , k_4 e k_5 – calculados pelas Equações (20), (21), (22), (23) e (24) – contemplam as relações geométricas mencionadas anteriormente. Já k_p é um coeficiente limitador, obtido pela Equação (25), responsável por garantir que a formulação represente adequadamente a condição de plastificação total do montante de alma quando esta ocorre.

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \leq k_p \quad (19)$$

$$k_1 = 0,782 + 19,712 \left(\frac{b_w}{t_w} \right)^{-1,011} \quad (20)$$

$$k_2 = 0,0325 + 0,00292 \frac{h_o}{t_w} \quad (21)$$

$$k_3 = 0,275 + 0,239 \exp \left(-0,093 \frac{h_t}{t_w} \right) \quad (22)$$

$$k_4 = 16,998 - 0,312 t_w \quad (23)$$

$$k_5 = 2,037 + 0,0360 \tan \alpha' \quad (24)$$

$$k_p = 0,58 \frac{f_y}{E} \left(\frac{h_o}{t_w} \right)^2 \quad (25)$$

3.2.5 Modelo analítico de Justino *et al.* (2020)

Justino *et al.* (2020) conduziram uma pesquisa de FMAV em perfis castelados em diferentes temperaturas. Ao todo, foram realizados 405 modelos numéricos em 5 temperaturas distintas. O modelo analítico proposto considera o impacto das altas temperaturas ao reduzir a resistência

ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço, dessa maneira, é possível calcular a força cortante resistente em diferentes temperaturas, inclusive a temperatura ambiente.

O modelo analítico desenvolvido por Justino *et al.* (2020) é baseado em critérios propostos por Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu (2014) e procedimentos de cálculo da ABNT NBR 14323:2013, onde os autores realizaram adaptações e correções dos procedimentos, resultando num modelo representativo semiempírico para o modo de falha por FMAV para perfis castelados.

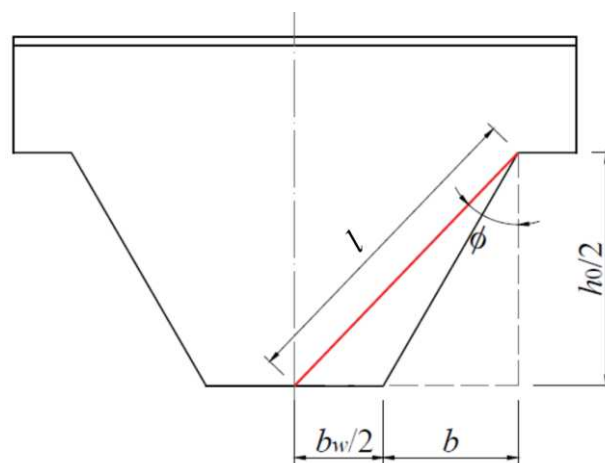
De maneira similar ao procedimento de cálculo de Vieira (2015), Justino *et al.* (2020) propõem o cálculo da força cortante de plastificação e um fator de redução associado à flambagem. A força cortante de plastificação proposta por Justino *et al.* (2020) é dada pela Equação (26).

$$V_{p,Justino} = \frac{b_w \cdot t_w}{2a_j} f_y \left(\frac{h_o}{l_{ef,Justino}} \right)^2 \quad (26)$$

com: $a_j = \begin{cases} 1,25 & \text{para padrão Anglo-saxão} \\ 2,50 & \text{para padrões Litzka e Peiner} \end{cases}$

O comprimento de flambagem adotado por Justino *et al.* (2020) é obtido de forma similar ao proposto por Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu (2014), os quais sugerem que o comprimento da barra seja calculado pela metade do comprimento entre as máximas tensões de compressão no montante de alma. Na Figura 13 é apresentado o comprimento de flambagem adotado por Justino *et al.* (2020) para perfis castelados ($l_{ef,Justino}$), o que é dado pela Equação (27).

Figura 13 - Comprimento de flambagem de Justino.



Fonte: Justino *et al.* (2020).

$$l_{ef,Justino} = \sqrt{\left(\frac{h_0}{2}\right)^2 + \left(b + \frac{b_w}{2}\right)^2} \quad (27)$$

O restante do procedimento de cálculo do fator de redução associado à compressão é baseado, com algumas adaptações, na ABNT NBR 14323:2013. A esbeltez da barra comprimida é obtida através de uma adaptação da Equação (6), resultando na Equação (28).

$$\lambda_{Justino} = \dot{K} \frac{l_{ef,Justino} \sqrt{12}}{t_w} \quad (28)$$

$$\text{com: } \dot{K} = \begin{cases} 0,50 & \text{para padrão anglo-saxão} \\ 0,40 & \text{para padrão Litzka} \\ 0,45 & \text{para padrão Peiner} \end{cases}$$

A esbeltez reduzida utilizada por Justino *et al.* (2020) é dada pela Equação (29). No entanto, para o procedimento de cálculo proposto, é utilizada a esbeltez reduzida em situação de incêndio ($\bar{\lambda}$) disposta na ABNT NBR 14323:2013, a qual é calculada pela Equação (30).

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (29)$$

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\bar{\lambda}}{0,85} \quad (30)$$

O cálculo do fator de redução associado à compressão (χ_J) utilizado por Justino *et al.* (2020) é dado pela Equação (31).

$$\chi_J = \frac{1}{\phi_J + \sqrt{\phi_J^2 - \lambda_{0,fi}^2}} \leq 1 \quad (31)$$

$$\text{Com: } \phi_J = 0,372 [1 + \alpha \cdot \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2]$$

$$\alpha = 0,033 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Por fim, o cálculo da força cortante média (V_{Rm}) proposta por Justino é dado pela Equação (32).

$$V_{Rm} = V_{p,Justino} \cdot \chi_J \quad (32)$$

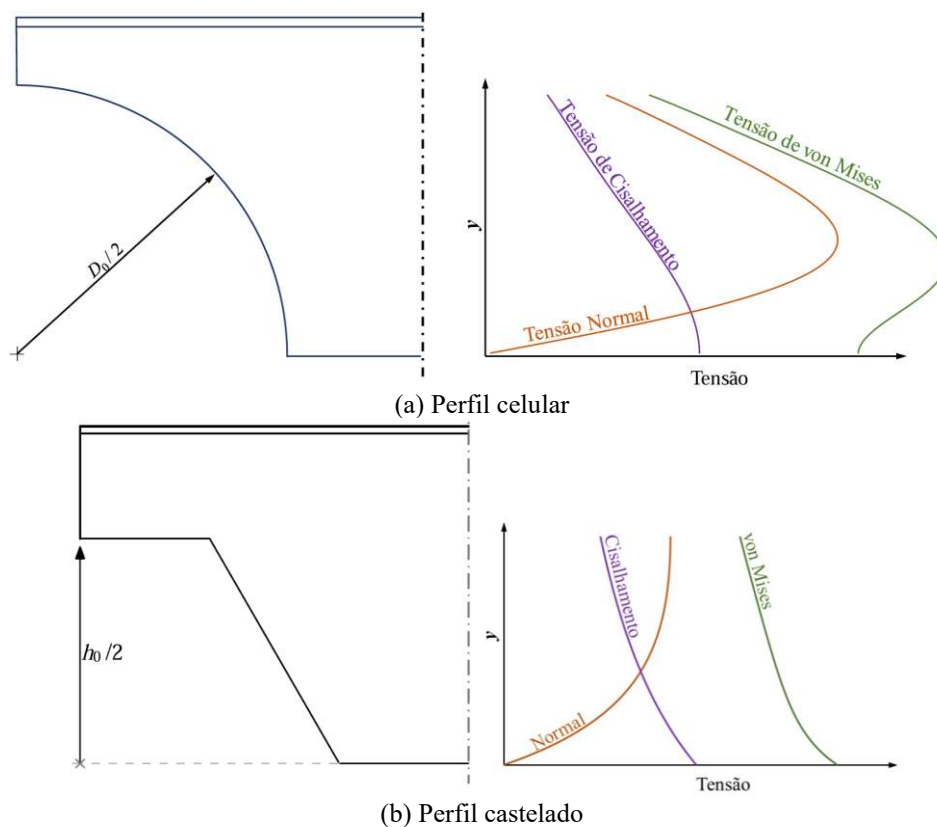
3.2.6 Modelo analítico de Valente (2018)

Valente (2018) estudou o comportamento de vigas casteladas de aço em situação de incêndio, com foco nas falhas por plastificação. A autora realizou um estudo com 180 modelos numéricos

com diferentes padrões de corte e temperatura, em que a calibração dos modelos foi realizada com base em resultados experimentais disponíveis na literatura. Sua abordagem para o modo de falha por FMAV se baseou no modelo proposto por Grilo *et al.* (2018), em que a autora realizou uma adaptação do modelo analítico para perfis encastelados.

Grilo *et al.* (2018) formularam uma equação semiempírica para o modo de falha por FMAV em perfis celulares considerando as curvas de plastificação, flambagem inelástica e flambagem elástica. O cálculo da força cortante de plastificação nesse modelo é obtido com base na tensão máxima de Von Mises, com ajustes empíricos. Valente (2018) realizou o mesmo estudo e identificou que a tensão máxima de Von Mises ocorre em local diferente nos perfis castelados (Ver Figura 14), dessa forma, a autora realizou uma modificação na expressão para perfis castelados. O cálculo da força cortante de plastificação proposta por Valente (2018) ($V_{v,p,Valente}$) é dado pela Equação (33).

Figura 14 - Distribuição de tensões na alma de vigas alveolares.



Fonte: (a) Grilo (2018); (b) Valente (2018).

$$V_{v,p,valente} = \beta_v \cdot f_y \frac{t_w \cdot b_w}{\sqrt{3}} \left(\frac{2y_o}{p} \right) \quad (33)$$

$$\text{com: } \beta_v = \begin{cases} 0,840 - 0,00264 \frac{b_w}{t_w} & \text{para padrão Litzka} \\ 0,875 - 0,00232 \frac{b_w}{t_w} & \text{para padrão Peiner} \\ 1,164 + 0,00843 \frac{b_w}{t_w} & \text{para padrão Anglo-saxão} \end{cases}$$

O cálculo do comprimento de flambagem adotado pela autora é equivalente ao adotado por Justino (2018) e Justino *et al.* (2020), sendo calculado pela Equação (27), enquanto o índice de esbeltez é calculado pela Equação (6). Já a esbeltez reduzida (λ_0) é obtida pela Equação (34).

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (34)$$

Com o índice de esbeltez reduzido é possível calcular o fator de redução (χ_v) proposto por Valente (2018), o qual é apresentado pela Equação (35) com os coeficientes de ajuste apresentados na Tabela 8.

$$\chi_v = \begin{cases} \frac{\ddot{a}}{\lambda_0^{\ddot{b}}} \leq 1 & \text{para } \bar{\lambda} \geq 1 \\ 1,1 \cdot \ddot{c} \lambda_0^{2,51} \leq 1 & \text{para } \bar{\lambda} < 1 \end{cases} \quad (35)$$

Tabela 8 – Coeficientes de ajuste \ddot{a} , \ddot{b} e \ddot{c} (Valente, 2018).

Padrão	\ddot{a}	\ddot{b}	\ddot{c}
Litzka	0,858	0,87	0,780
Peiner	0,787	0,99	0,715
Anglo-saxão	0,705	1,34	0,641

Por fim, o cálculo da força cortante média proposta por Valente (2018) (V_{Rm}) é dado pela Equação (36).

$$V_{Rm} = V_{v,p,valente} \cdot \chi_v \quad (36)$$

3.3 Descrição do modelo numérico

A avaliação da FMAV tem sido amplamente conduzida por meio de análises numéricas, utilizando tanto modelos do perfil completo (Redwood; Demirdjian, 1998; Santos *et al.*, 2025; Valente, 2018; Wang *et al.*, 2016) quanto representações reduzidas de um único montante de alma (Justino *et al.*, 2020; Miranda *et al.*, 2023; Panedpojaman; Thepchatrri; Limkatanyu, 2014; Tsavdaridis; D’Mello, 2011). Entre essas alternativas, a modelagem de um único montante de alma apresenta vantagens como redução do custo computacional, a eliminação de efeitos de borda e o isolamento do fenômeno de FMAV, permitindo a investigação direta do comportamento local do montante. Por essas características, tem sido recomendada para estudos de variação de parâmetros voltados a investigações da FMAV (Grilo *et al.*, 2018; Limbachiya; Shamass, 2021).

Com base nesses benefícios, o presente trabalho adota a modelagem de um único montante de alma. No ARTIGO 1, foi desenvolvido um estudo de calibração dessa abordagem para avaliação da FMAV em perfis alveolares, no qual foi proposta uma estratégia de modelagem que apresenta um equilíbrio adequado entre precisão e eficiência computacional. Essa estratégia é empregada nas análises numéricas do presente estudo e descrita na sequência.

A análise numérica é estruturada em duas etapas principais. Inicialmente, o modelo é discretizado com elementos de casca quadrangulares com integração reduzida (S4R), adotando-se um tamanho médio de malha definido pelo menor valor entre 10 mm, $b_w/5$ e $d_g/40$. Sobre essa discretização, aplica-se uma imperfeição geométrica inicial obtida a partir do modo de flambagem associado ao menor autovalor positivo da análise elástica, com amplitude igual a $d_g/100$. Em seguida, procede-se à análise não linear pelo método de Riks, utilizada para estimar a força cortante última vinculada ao modo de falha por FMAV (Grilo *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2020; Miranda *et al.*, 2023).

A geometria do montante, o modelo constitutivo do aço e o sistema de eixos adotado são mostrados na Figura 6. As condições de contorno consideradas são apresentadas na Tabela 9. A força cortante é aplicada de forma distribuída ao longo da alma direita do montante.

Figura 15 - Modelo constitutivo Trilinear.

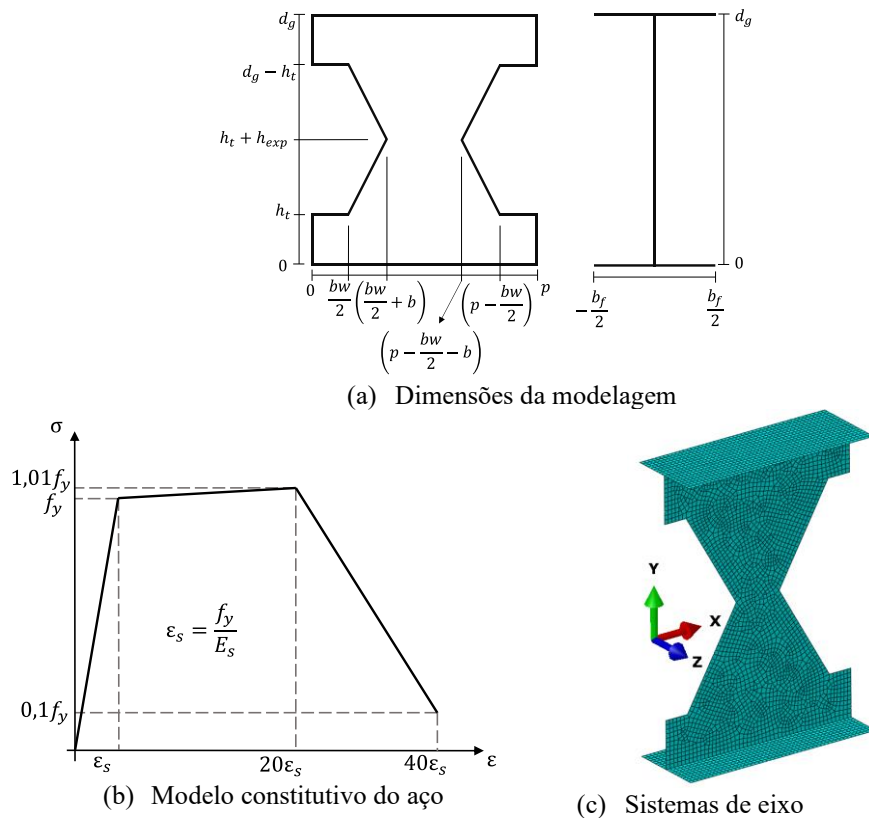


Tabela 9 - Condições de contorno do modelo de um único montante de alma.

Condição de Contorno	u_x	u_y	u_z	r_x	r_y	r_z
Alma Esq	X	X	X	X		
Mesa Esq	X	X		X	X	
Alma Dir			X	X		
Mesa Dir				X	X	

X – Restringido
u representa a translação e r representa a rotação em torno dos eixos

3.3.1 Estudo de variação de parâmetros

Para o estudo de variação de parâmetros, foram considerados perfis da série VCS (ArcelorMittal, 2025), que reúne 113 perfis de alma cheia cujas seções foram customizadas para a fabricação de perfis alveolares com máximo desempenho. A adoção desse conjunto de perfis assegura representatividade de vigas de diferentes portes estruturais na investigação da FMAV, preservando a aplicabilidade prática dos resultados.

A variação geométrica dos perfis castelados foi conduzida a partir de três arranjos clássicos de padrões de corte: anglo-saxão, Lizka e Peiner. Para todos eles, adotou-se uma razão de expansão fixa ($d_g/d = 1,5$), considerando a taxa de expansão ótima (Galambos, Hosain e Speirs, 1973), valor amplamente utilizado em aplicações reais e compatível com a prática de fabricação desses

perfis. Além das variações geométricas, investigou-se a influência do tipo de aço na resposta estrutural. Consideraram-se dois materiais usuais no contexto brasileiro: ASTM A36 e USI-CIVIL-350, com tensões de escoamento iguais a 250 MPa e 350 MPa, respectivamente.

Ao todo, foram realizadas 678 simulações numéricas, sendo 226 para cada um dos três padrões geométricos, considerando-se os dois tipos de aço analisados. Esses conjuntos de modelos proporcionaram uma ampla base de resultados para a avaliação comparativa dos modelos analíticos disponíveis na literatura.

3.4 Resultados e discussão

As formulações analíticas discutidas no Tópico 3.2 foram avaliadas aplicando-se, em cada modelo, as combinações geométricas e mecânicas definidas no estudo de variação de parâmetros. A partir dessas entradas, obtiveram-se estimativas da resistência à força cortante por FMAV para os perfis castelados analisados. Em seguida, esses valores foram confrontados com os resultados numéricos obtidos nas simulações, possibilitando verificar o desempenho de cada formulação para cada padrão de corte. Os resultados do padrão anglo-saxão estão apresentados na Figura 16, os do padrão Litzka na Figura 17 e, por fim, os do padrão Peiner na Figura 18.

Figura 16 - Comparação dos resultados obtidos dos modelos analíticos com os numéricos - Padrão Anglo-saxão.

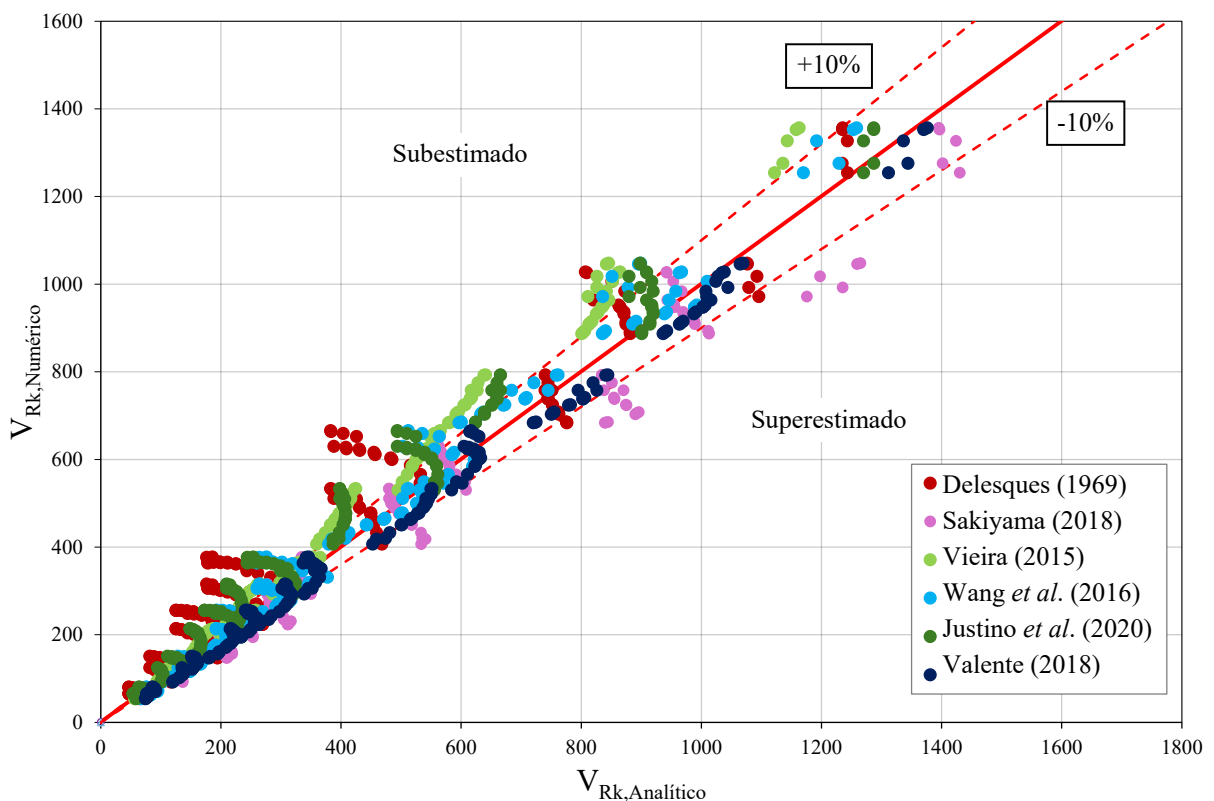


Figura 17 - Comparação dos resultados obtidos dos modelos analíticos com os numéricos - Padrão Litzka.

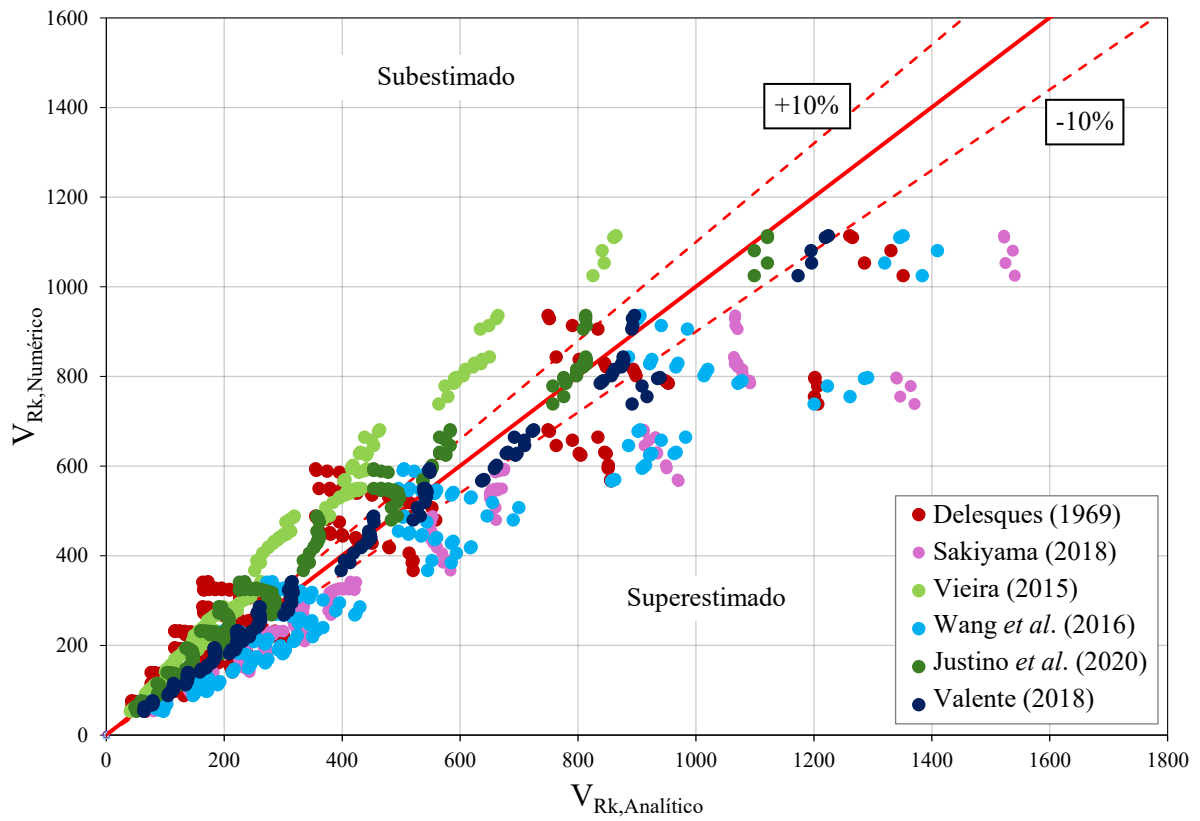
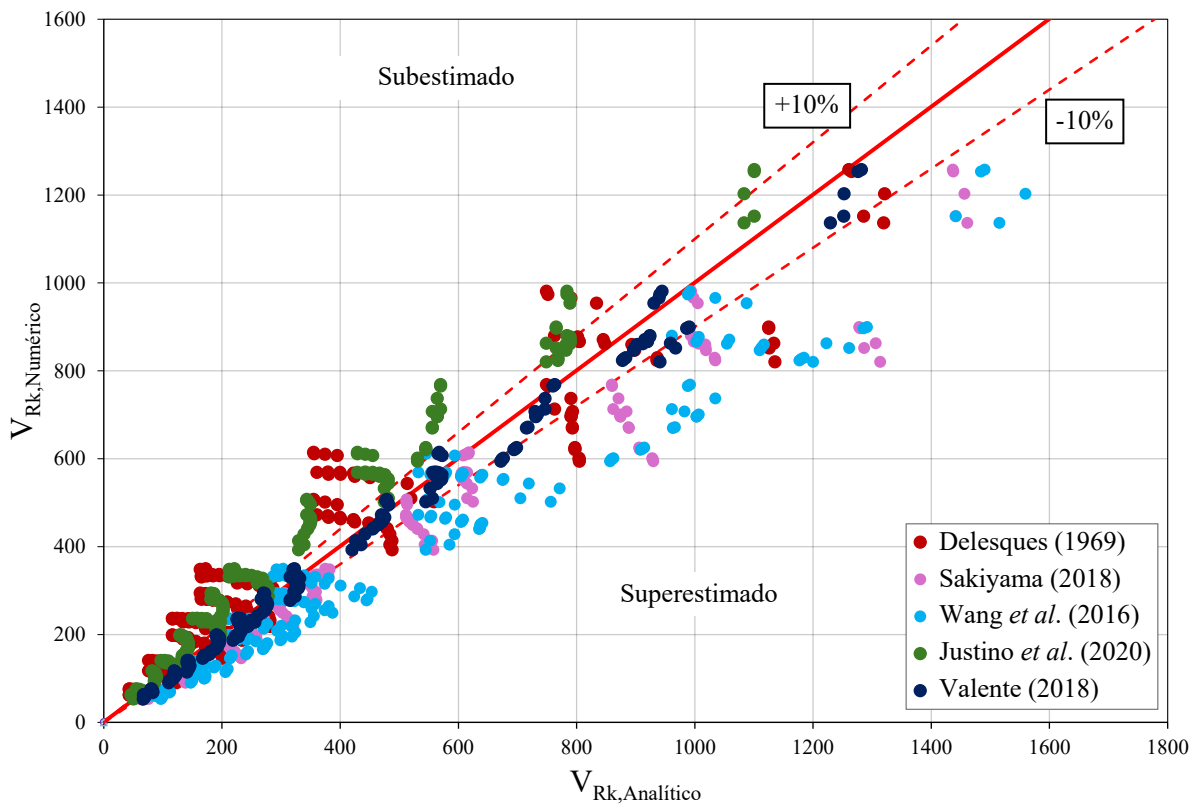


Figura 18 - Comparação dos resultados obtidos dos modelos analíticos com os numéricos - Padrão Peiner.



De forma geral, observa-se que os resultados obtidos para o padrão anglo-saxão apresentam maior proximidade em relação à faixa de $\pm 10\%$, indicando desempenho mais assertivo na predição da força cortante resistente à FMAV. Considerando os três padrões analisados, o modelo de Delesques (1969), que é o mais antigo de todos os considerados neste trabalho, apresenta dispersão superior aos demais modelos analíticos. No padrão anglo-saxão, os modelos de Sakiyama (2018) e Valente (2018) tendem a superestimar a resistência à FMAV, enquanto os demais modelos apresentam comportamento predominantemente conservador. Para o padrão Litzka, além dos modelos de Sakiyama (2018) e Valente (2018), o modelo de Wang *et al.* (2016) também superestima a resistência, ao passo que os modelos de Vieira (2015) e Justino *et al.* (2020) demonstram tendência à subestimação. De maneira semelhante, no padrão Peiner, os modelos de Wang *et al.* (2016), Sakiyama (2018) e Valente (2018) apresentam tendência à superestimação, embora no caso do modelo de Valente (2018) essa tendência se manifeste de forma mais moderada, enquanto o modelo de Justino *et al.* (2020) permanece conservador.

Após a análise visual preliminar dos resultados numéricos comparados com as previsões fornecidas pelos modelos analíticos, realizou-se uma avaliação estatística destinada a verificar a qualidade e a consistência das formulações testadas. Para cada modelo analítico, foram calculadas as métricas recomendadas pela EN 1990:2009 (Anexo D). Esse procedimento estatístico baseia-se na hipótese de que a razão entre os resultados numéricos e as previsões analíticas pode ser descrita por uma distribuição lognormal, permitindo quantificar tanto o viés sistemático do modelo quanto a dispersão associada às previsões. O fator b representa a tendência média da formulação, enquanto o coeficiente de variação $V\delta$ expressa a variabilidade relativa dos desvios. Ressalta-se que valores de b superiores a 1 indicam subestimação da capacidade resistente pelos modelos analíticos, ao passo que valores inferiores a 1 indicam superestimação em relação aos resultados numéricos.

Os resultados estatísticos obtidos para os perfis castelados são apresentados separadamente para cada padrão de corte, permitindo distinguir diferenças de desempenho das formulações entre as geometrias avaliadas. Dessa forma, a análise estatística correspondente ao padrão anglo-saxão é exibida na Figura 19, os resultados do padrão Litzka são mostrados na Figura 20 e aqueles associados ao padrão Peiner são apresentados na Figura 21.

Figura 19 - Desempenho estatístico dos modelos analíticos - Padrão anglo-saxão.

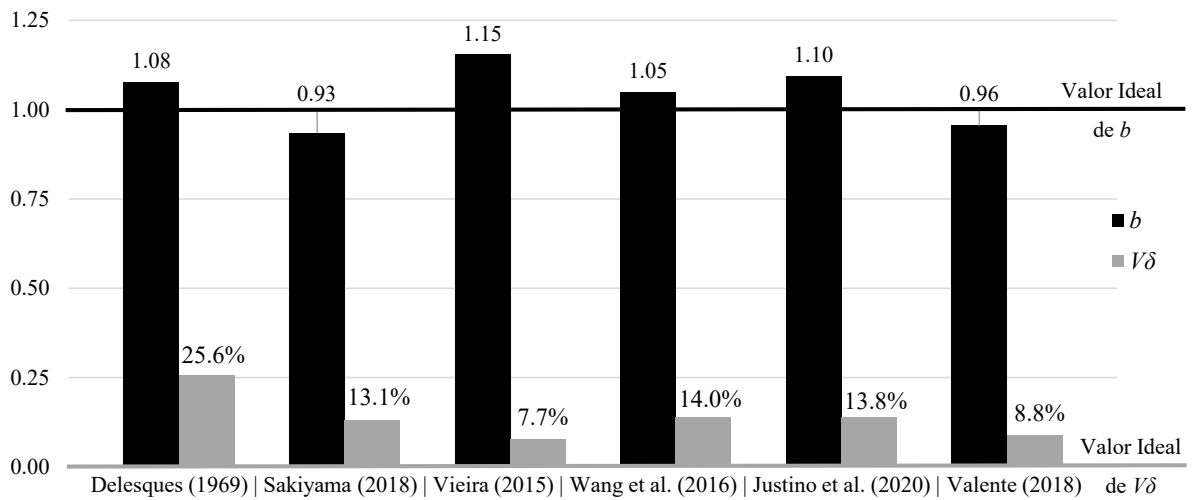


Figura 20 - Desempenho estatístico dos modelos analíticos - Padrão Litzka.

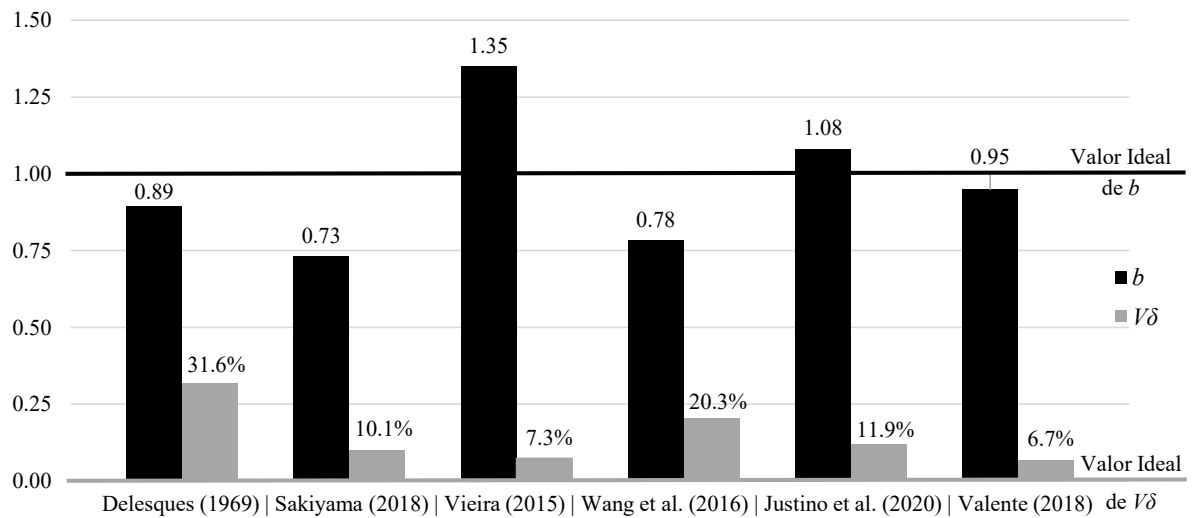
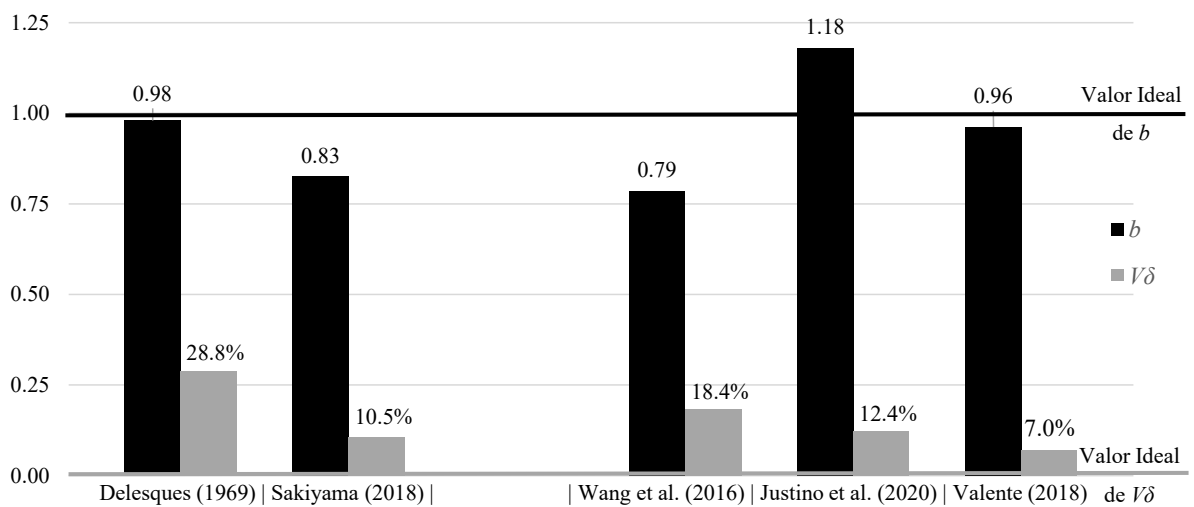
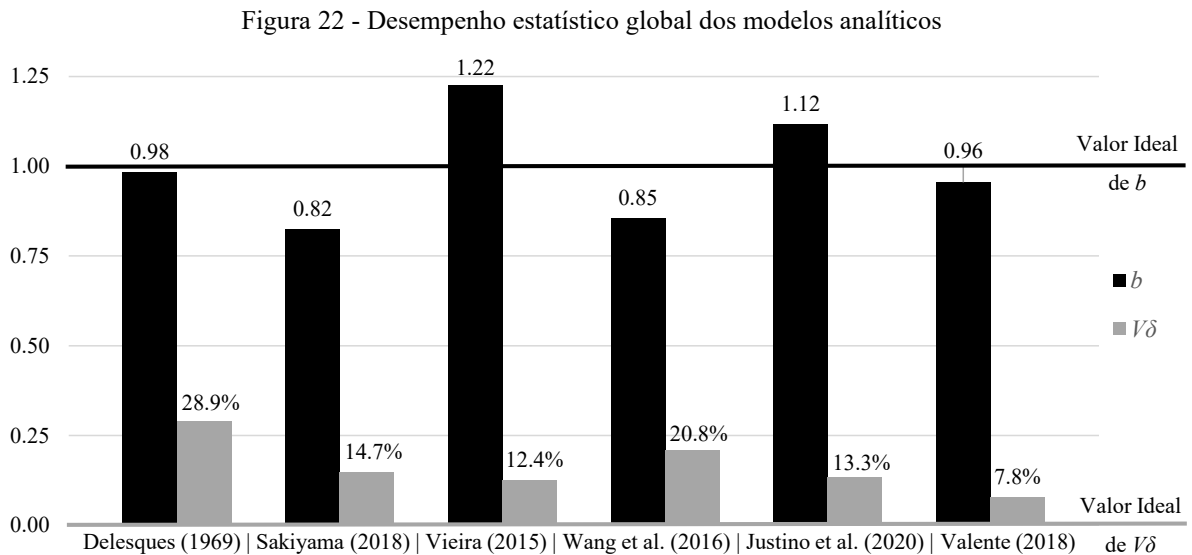


Figura 21 - Desempenho estatístico dos modelos analíticos - Padrão Peiner.



Além da avaliação individual por padrão de corte, realizou-se também uma análise estatística global considerando conjuntamente todos os perfis analisados. Essa abordagem permite qualificar a consistência das formulações analíticas de forma integrada, avaliando sua robustez frente às variações geométricas e identificando os modelos que apresentam fatores médios mais próximos de 1 e menores coeficientes de variação. A avaliação global é apresentada na Figura 22.



A análise dos resultados estatísticos confirma as observações realizadas anteriormente, em que é possível perceber que os modelos analíticos para o padrão anglo-saxão apresentaram desempenho melhor que os outros dois padrões, pois os fatores médios dos modelos analíticos estão mais próximos de 1 e os coeficientes de variação dos erros são menores que os dos outros padrões, considerando uma abordagem geral. Além disso, percebe-se que o modelo de Delesques (1969) apresentou coeficiente de variação elevado em todos os casos. Também é possível perceber que as estimativas da capacidade resistente do perfil à FMAV dos modelos analíticos apresentam resultados divergentes entre si, observação já apontada em estudos anteriores envolvendo estudos de FMAV em perfis celulares (Saternus, 2022; Shamass; Guarracino, 2020).

Entre os modelos avaliados nos três padrões de corte, destacam-se as formulações de Vieira (2015) e de Valente (2018), que apresentaram os menores coeficientes de variação. A formulação de Vieira (2015) apresentou valores sistematicamente conservadores, com fatores médios iguais a 1,15 e 1,35 para os padrões anglo-saxão e Litzka, respectivamente, e coeficientes de variação de 7,7% e 7,3%, evidenciando baixa dispersão dentro de cada conjunto geométrico. Na avaliação global, obteve-se fator médio igual a 1,22, com coeficiente de

variação de 12,4%. O aumento do coeficiente de variação superior a 60% em relação às análises individuais decorre do afastamento entre os fatores médios dos dois padrões, indicando que, embora o modelo apresente estabilidade interna em cada geometria, sua resposta não é uniforme quando considerada de forma integrada. Além disso, o autor não propôs formulação específica para o padrão Peiner, limitando sua aplicabilidade.

Por outro lado, o modelo de Valente (2018) apresentou comportamento mais uniforme entre os diferentes padrões geométricos, com fatores médios iguais a 0,96, 0,95 e 0,96 para os padrões anglo-saxão, Litzka e Peiner, respectivamente, e coeficientes de variação de 8,8%, 6,7% e 7,0% para os mesmos padrões, resultando em fator médio global de 0,96 e coeficiente de variação de 7,8%. Embora esses resultados indiquem leve tendência à superestimação, a baixa dispersão e a estabilidade entre os padrões demonstram maior consistência estrutural da abordagem. Com o objetivo de eliminar o viés sistemático observado e aproximar o fator médio do valor ideal igual a 1, propõe-se a aplicação de um coeficiente redutor de 0,95 aos resultados da equação original, dessa forma, o valor médio da resistência à força cortante associada à FMAV em perfis castelados é dado pela Equação (37). A adoção desse fator conduz a um valor médio global próximo de 1,01, mantendo a baixa dispersão observada e resultando em um modelo ajustado levemente conservador.

$$V_{Rm} = 0,95 \cdot V_{v,p,valente} \cdot \chi_v \quad (37)$$

3.5 Modelo característico e de cálculo

A partir do valor médio, os valores característicos e de cálculo foram determinados conforme a metodologia apresentada no Anexo D da EN 1990:2009, sendo obtidos pelas Equações (38) e (39), respectivamente.

$$V_{Rk} = a_k \cdot V_{Rm} \quad (38)$$

$$V_{Rd} = a_d \cdot V_{Rm} \quad (39)$$

Para a determinação da variabilidade básica (V_{Rt}), é necessário considerar a variabilidade dos parâmetros do modelo analítico, incluindo a resistência ao escoamento do aço ($V_{X_{fy}}$) e propriedades geométricas do perfil castelado. Neste trabalho, a variabilidade das propriedades geométricas ($V_{X_{geo}}$) foi representada de forma global por meio de um coeficiente de variação associado à área da seção, em razão da complexidade envolvida na propagação individual das incertezas geométricas. Considera-se que o procedimento adotado no presente trabalho é uma aproximação coerente com os fenômenos em causa, uma vez que a resistência ao cisalhamento

depende do produto do produto entre a tensão de escoamento e uma área resistente do perfil. Em razão da indisponibilidade de um estudo específico a respeito da variabilidade relacionada a cada um dos parâmetros geométricos que influenciam os modos de falha de perfis alveolares, foram adotados os valores recomendados pelo JCSS Probabilist Model Code – Part III: Resistance Models para perfis laminados, que são próximos aos apresentados por Melcher *et al.* (2004).

Tendo em vista o grande número de simulações realizadas neste trabalho, os fatores de conversão do modelo médio para os níveis característico (a_k) e de cálculo (a_d) foram obtidos com base nas Equações (40) e (41). Com base nesses coeficientes, o fator de segurança implícito do modelo é obtido pela Equação (42).

$$a_k = b \cdot \exp(-1,64 Q - 0,5Q^2) \quad (40)$$

$$a_d = b \cdot \exp(-3,04 Q - 0,5Q^2) \quad (41)$$

$$\gamma_{model} = \frac{a_k}{a_d} \quad (42)$$

Os valores obtidos para esses coeficientes são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros para definição do modelo analítico.

Modelo analítico	b	V_δ	$V_{X,fy}$	$V_{X,geo}$	V_{rt}	V_r	Q	a_k	a_d	γ_{model}
V_{Rm} [Eq. (37)]	1,01	7,8%	7,0%	3,2%	7,7%	10,9%	0,109	0,84	0,72	1,16

Substituindo-se os valores de a_k e a_d (Tabela 10) nas Equações (38) e (39), obtêm-se as expressões da resistência à força cortante associada à FMAV nos níveis característico e de cálculo, apresentadas nas Equações (43) e (44).

$$V_{Rk} = 0,79 \cdot V_{v,p,valente} \cdot \chi_v \quad (43)$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{model}} = 0,68 \cdot V_{v,p,valente} \cdot \chi_v \quad (44)$$

Com a aplicação da metodologia da EN 1990:2009 (Anexo D), foi possível obter os modelos característicos e de cálculo a partir de um modelo médio, o que é relevante para permitir a aplicação em projetos correntes. Não obstante, como não foi avaliada a variabilidade dos parâmetros geométricos específicos para perfis castelados, entende-se que esse é um tema que justifica estudos posteriores, considerando-se os distintos processos de corte e solda, envolvidos na fabricação dos perfis alveolares.

3.6 Conclusões

Neste trabalho, realizou-se uma compilação dos principais modelos analíticos disponíveis na literatura para a estimativa da resistência de perfis castelados à FMAV. Para avaliar o desempenho dessas formulações, desenvolveu-se um estudo numérico contemplando as variações geométricas com os perfis da série VCS (ArcelorMittal, 2025), realizando um número expressivo de simulações numéricas (678) para os padrões de corte anglo-saxão, Litzka e Peiner. As resistências obtidas numericamente foram confrontadas com as previsões analíticas por meio de análises estatísticas conduzidas conforme os procedimentos estabelecidos na EN 1990:2009.

Os resultados evidenciaram que os modelos analíticos existentes fornecem estimativas distintas, comportamento semelhante ao previamente observado em estudos envolvendo perfis celulares (Saternus, 2022; Shamass; Guarracino, 2020). No entanto, a análise comparativa desenvolvida neste trabalho permitiu identificar que, para perfis castelados, o modelo proposto por Valente (2018) apresenta o melhor desempenho global na predição da resistência última à FMAV, apesar de apresentar uma leve tendência de superestimar a capacidade resistente. Esse modelo resultou em fatores médios de correção (b) de 0,96, 0,95 e 0,96 e coeficientes de variação dos erros ($V\delta$) de 8,8%, 6,7% e 7,0% para os padrões anglo-saxão, Litzka e Peiner, respectivamente, conduzindo a um fator médio global de 0,96 e coeficiente de variação de 7,8%. Considerando essa tendência sistemática à superestimação, recomenda-se a aplicação de um coeficiente redutor de 0,95 aos resultados da equação original, o que conduz a um fator médio global próximo de 1,01, mantendo a baixa dispersão observada e resultando em uma formulação ajustada com comportamento levemente conservador.

Dessa forma, o estudo contribui para suprir lacunas relevantes da literatura ao empregar um estudo de variação de parâmetros com número expressivo de simulações numéricas calibrado para perfis alveolares, avaliando o desempenho dos modelos analíticos disponíveis para perfis castelados e identificando aquele que apresenta melhor desempenho. Assim, os resultados fornecem subsídios técnicos relevantes para aplicações práticas de projeto, bem como para futuras normas e revisões normativas relacionadas à verificação da resistência ao cisalhamento governada pela FMAV em perfis castelados.

Referências

- ARCELORMITTAL. *Vigas Celulares ArcelorMittal - Catálogo VCS*. Brasil: [s. d.], 2025. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/software-vca>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14323:2013 – *Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro: [s. d.], 2013.
- BOYER, J. P. *Castellated Beams - New Developments*. Engineering Journal, [s. l.], vol. 1, no 3, p. 104–108, 1964.
- BRINKHUS, R. N. *Análise de Vigas Casteladas e Vigas Casteladas Mistas*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/115556>.
- DELESQUES, R. *Le Calcul des Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 41–51, 1969.
- DELESQUES, R. *Stabilité des Montants de Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 3, no 3, p. 26–33, 1968.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1990:2009. Eurocode - *Basis of structural design*. Brussels: [s. d.], 2009.
- GALAMBOS, A. R.; HOSAIN, M. U.; SPEIRS, W. G. *Optimum expansion ratio of castellated steel beams*. Engineering Optimization. 1:213-225; 1973.
- GONÇALVES, A. B. *Modelo analítico para dimensionamento de vigas alveolares mistas de aço e concreto*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6500>.
- GRILO, L. F. *et al. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 148, p. 525–541, 2018.
- GRILO, L. F. *Formulação para Determinação da Força Cortante Resistente de Flambagem do Montante de Alma em Vigas Celulares de Aço*. 2018. PhD Thesis - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUOS-B32NVX>.
- GRÜNBAUER, B. V. *What are castellated beams?* [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY (JCSS). *JCSS Probabilist Model Code - Part III: Resistance Models*. Zurich: 2002.
- JUSTINO, L. G. *Análise da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento em Vigas Casteladas de Aço em Situação de Incêndio*. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/18687>.

- JUSTINO, L. G. *et al.* **Shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams in fire**. *Engineering Structures*, [s. l.], vol. 209, p. 109960, 2020.
- KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. **Failure modes for castellated beams**. *Journal of Constructional Steel Research*, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 295–315, 1984.
- LAWSON, R. M. *et al.* **Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings**. *Journal of Constructional Steel Research*, [s. l.], vol. 62, no 6, p. 614–629, 2006.
- LIMBACHIYA, V.; SHAMASS, R. **Application of Artificial Neural Networks for web-post shear resistance of cellular steel beams**. *Thin-Walled Structures*, [s. l.], vol. 161, p. 107414, 2021.
- LUBKE, G. P. **Dimensionamento otimizado de vigas alveolares de aço**. Vitória-ES: [s. d.], 2017.
- MELCHER, J. *et al.* **Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products**. *Journal of Constructional Steel Research*, [s. l.], vol. 60, no 3–5, p. 795–808, 2004.
- MENKULASI, F. *et al.* **Investigation of Web Post Compression Buckling Limit State and Stiffener Requirements in Castellated Beams**. *Engineering Journal*, [s. l.], vol. 54, no 1, p. 21–44, 2017.
- MIRANDA, L. G. J. *et al.* **Comparative analysis of fire-adapted models for the shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams**. *Fire Safety Journal*, [s. l.], vol. 138, p. 103796, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711223000644>.
- OLIVEIRA, L. B. de. **Procedimentos para Definição das Características Geométricas de Vigas Alveolares de Aço para Sistemas de Piso e de Cobertura**. 2012. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3777>.
- PANEDPOJAMAN, P.; THEPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. **Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams**. *Thin-Walled Structures*, [s. l.], vol. 76, p. 92–104, 2014.
- REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. **Castellated Beam Web Buckling in Shear**. *Journal of Structural Engineering*, [s. l.], vol. 124, no 10, p. 1202–1207, 1998.
- SAE-LONG, W. *et al.* **Behavior and design implications of web-post shear failure in cellular beams**. *Results in Engineering*, [s. l.], vol. 27, p. 106709, 2025.
- SAKIYAMA, E. K. H. **Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento em Vigas Casteladas Soldadas**. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/20940>.
- SANTOS, E. V. *et al.* **Web-post buckling behaviour of composite beams with large elliptically-based web openings**. *Journal of Constructional Steel Research*, [s. l.], vol.

229, p. 109483, 2025. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X25001610>.

SATERNUS, P. *Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling*. Advances in Science and Technology Research Journal, [s. l.], vol. 16, no 1, p. 213–230, 2022.

SHAMASS, R.; GUARRACINO, F. *Numerical and analytical analyses of high-strength steel cellular beams: A discerning approach*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 166, p. 105911, 2020.

TSAVDARIDIS, K. D.; D’MELLO, C. *Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 67, no 10, p. 1605–1620, 2011.

VALENTE, M. T. *Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Casteladas de Aço em Situação de Incêndio com Ênfase nos Modos de Falha por Plastificação*. 2018. Master’s Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em:
<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/24521>.

VERÍSSIMO, G. de S. *et al. Estados Limites Aplicáveis às Vigas Alveolares de Aço*. Revista da Estrutura de Aço (Centro Brasileiro da Construção em Aço), [s. l.], vol. 2, no 2, p. 126–144, 2013.

VIEIRA, W. B. *Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma em Vigas Casteladas de Aço*. 2015. PhD Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6741>.

VIEIRA, W. B. *Simulação Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Casteladas de Aço com Ênfase na Flambagem do Montante De Alma*. 2011. Marter’s Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em:
<http://locus.ufv.br/handle/123456789/3744>.

WANG, P. *et al. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 121, p. 173–184, 2016.

ZAAROUR, W.; REDWOOD, R. *Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams*. Journal of Structural Engineering, [s. l.], vol. 122, no 8, p. 860–866, 1996.

4 ARTIGO 3 – Análise comparativa de modelos analíticos para predição da capacidade resistente à flambagem do montante de alma por cisalhamento em perfis celulares

Resumo

Perfis celulares permitem vencer vãos maiores que perfis de alma cheia de mesmo peso e facilitam a integração das instalações prediais pelas aberturas. Entretanto, a presença dessas aberturas altera a distribuição de tensões na alma e introduz modos de falha específicos, dentre eles a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV). Apesar da existência de diferentes modelos analíticos propostos para a estimativa da resistência à FMAV em perfis celulares, observa-se, na literatura, uma dispersão considerável entre as previsões fornecidas por essas formulações, bem como a carência de estudos comparativos abrangentes. Nesse contexto, este trabalho avaliou o desempenho dos principais modelos analíticos disponíveis para a predição da resistência última à FMAV em perfis celulares por meio de um estudo de variação de parâmetros composto por 5650 simulações numéricas, abrangendo uma ampla faixa de geometrias representativas. Os resultados numéricos foram confrontados com as previsões analíticas por meio de análises estatísticas fundamentadas na EN 1990:2009. As análises confirmam as discrepâncias entre os modelos avaliados e apontam limitações quanto à sua capacidade preditiva. Com base nesses resultados, foram propostas modificações em um modelo analítico existente, resultando em melhorias na precisão da estimativa da resistência à FMAV em perfis celulares, contribuindo para o aprimoramento do dimensionamento de perfis celulares e fornecendo subsídios para o desenvolvimento de formulações analíticas mais consistentes.

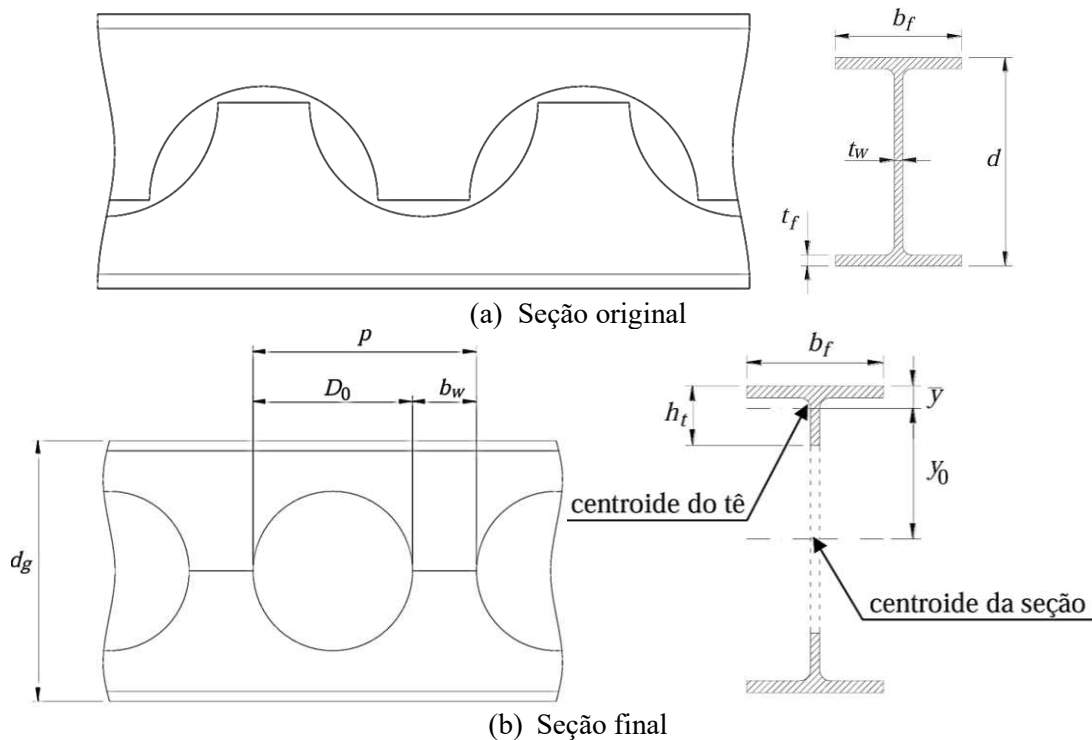
Palavras-chave: Perfis alveolares, força cortante resistente, estudo de variação de parâmetros, análise estatística, método dos elementos finitos.

4.1 Introdução

Perfis celulares são formados a partir do corte de um perfil laminado ou soldado (Figura 23a), translação das metades obtidas e posterior ligação das metades por solda formando alvéolos circulares ao longo do comprimento do perfil (Figura 23b) (Shamass; Guarracino, 2020). Esses perfis possuem diversas vantagens em relação aos perfis de alma cheia, como permitir a passagem de instalações pelos alvéolos, reduzir a altura do pé-direito, viabilizar o reforço de edifícios antigos, melhor rendimento estrutural, dentre outras (Grilo *et al.*, 2018; Menkulasi *et*

al., 2017; Santos *et al.*, 2025). Além disso, os avanços dos processos de automação têm possibilitado a produção de perfis celulares a custos competitivos, por isso, esses perfis estão sendo cada vez mais produzidos (Menkulasi *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2025).

Figura 23 - Simbologia das vigas alveolares



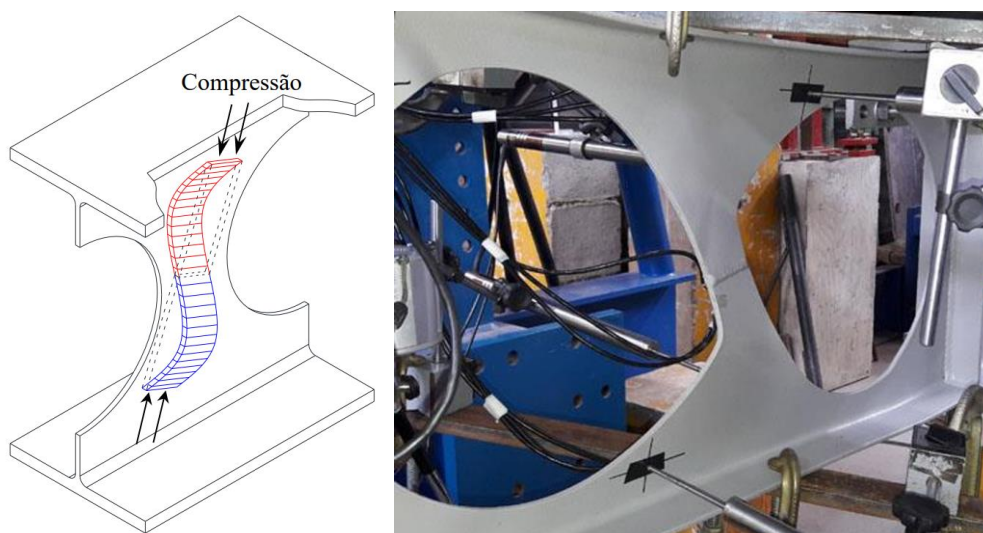
Fonte: adaptado de Grilo (2018).

Os perfis celulares apresentam rigidez à flexão maior e menor peso em comparação ao perfil original. No entanto, a presença dos alvéolos na alma altera a distribuição de tensões na seção e, conseqüentemente, seu comportamento estrutural difere do de perfis de aço de alma cheia, o que requer a investigação dos modos de falha específicos para um projeto seguro (Sae-Long *et al.*, 2025). Embora compartilhem alguns modos de falha com os perfis de alma cheia, os perfis alveolares apresentam modos de falha próprios. Esses modos de falha são descritos em Gonçalves (2015), Grilo (2018) e Shamass; Guarracino (2020). Um deles é a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV), foco de investigação do presente trabalho.

A FMAV é um modo de falha provocado pela distorção do montante de alma sob ação da força cortante. Essa distorção gera uma diagonal comprimida que pode induzir a flambagem do montante de alma em duas ondas, em razão da estabilização proporcionada pela diagonal tracionada, como ilustrado na Figura 24. Diversos autores investigaram esse fenômeno por meio de ensaios e análises numéricas em perfis celulares com diferentes tipos de aço e geometrias, e alguns deles propuseram modelos analíticos para estimar a força cortante resistente associada à

FMAV (Delesques, 1969; Grilo *et al.*, 2018; Lawson; Oshatogbe; Newman, 2004; Limbachiya; Shamass, 2021; Panedpojaman; Thepchatri; Limkatanyu, 2014; Shamass; Guarracino, 2020; Tsavdaridis; D’Mello, 2011; Veríssimo *et al.*, 2013; Vieira, 2014; Wang; Wang; Liu, 2014; Ward, 1990). Entretanto, os resultados fornecidos por esses modelos analíticos apresentam divergências consideráveis (Saternus, 2022; Shamass e Guarracino, 2020), e a literatura carece de um estudo robusto que avalie comparativamente o desempenho dessas formulações frente a uma ampla variedade de geometrias. Essa ausência de uma análise abrangente constitui uma lacuna importante no atual estado da arte, especialmente diante da crescente utilização de perfis celulares. Sem uma investigação comparativa robusta, permanece incerto qual dos modelos analíticos propostos na literatura representa melhor o fenômeno da FMAV e, caso exista, qual seria esse modelo.

Figura 24 - Fenômeno da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento



Fonte: Grilo *et al.* (2018)

Para suprir essa lacuna, realizou-se uma análise comparativa robusta baseada em um amplo estudo de variação de parâmetros com perfis da série VCS (ArcelorMittal, 2025), desenvolvidas para máximo desempenho em perfis alveolares. construído a partir do catálogo VCS da ArcelorMittal, específico para perfis alveolares. Ao todo, foram realizadas 5650 simulações numéricas, possibilitando uma avaliação consistente do desempenho dos modelos analíticos em ampla variedade de geometrias – abrangência superior à estudos anteriores. Além disso, o trabalho compila e sistematiza os principais modelos analíticos de FMAV da literatura, confrontando-os com a base numérica gerada. A partir dessa comparação, identificou-se que nenhum dos modelos disponíveis apresenta desempenho satisfatório na predição do comportamento da FMAV. Assim, foi proposto um ajuste em um dos modelos analíticos,

visando aprimorar sua aderência aos resultados numéricos. Por fim, o estudo contribui para revisões normativas ao apontar um modelo analítico mais preciso para estimar a força cortante resistente associada à FMAV em perfis celulares.

4.2 Modelos analíticos para força cortante resistente à FMAV

Nesta seção é apresentada uma revisão sucinta da literatura sobre modelos analíticos para prever a força cortante resistente à FMAV, incluindo a descrição das formulações de cada autor. Em alguns casos, foram realizadas reformulações algébricas e ajustes notacionais com o objetivo de padronizar a apresentação das equações, sem qualquer alteração em seu significado físico ou nos resultados obtidos, mantendo plena consistência com as formulações originais.

4.2.1 Modelo analítico de Delesques (1969)

O francês Delesques (1968) deduziu uma expressão analítica para avaliar o fenômeno de FMAV em perfis castelados com chapas expansoras. No entanto, a expressão era extensa, o que gerava dificuldade para aplicação. Para resolver essa situação, Delesques (1969) propôs outra equação, mais simples e conservadora. Apesar dessa expressão ter sido originada para perfis castelados, alguns autores utilizaram e fizeram adaptações dessa expressão em estudos de perfis celulares (Brinkhus, 2015; Lubke, 2017; Veríssimo *et al.*, 2013).

A expressão deduzida por Delesques (1969) para a flambagem elástica do montante foi deduzida com base em um método de energia. No presente trabalho, essa formulação foi reescrita com adequação das nomenclaturas geométricas às definições adotadas para perfis celulares, mantendo inalterada a estrutura matemática da equação. A força cortante crítica (V_{cr}) adaptada às convenções deste estudo é apresentada na Equação (45):

$$V_{cr} = \frac{E \cdot t_w^3}{1,18 \cdot y_o} \left[1 + (1 - 2\rho) \left(1 - 0,8 \frac{D_o}{2 y_o} \right) \right] \quad (45)$$

com: $\rho = \frac{b_w}{p}$

Com base na hipótese de uma distribuição elástica de tensões, Delesques (1969) desenvolveu uma expressão para calcular a força cortante resistente ao escoamento do montante de alma (V_e), utilizada na determinação da força cortante média do perfil alveolar. De forma análoga, a equação foi ajustada às convenções geométricas adotadas para perfis celulares, sem alteração de sua formulação original, sendo apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Força cortante resistente ao escoamento do montante de alma

Condições	V_e
$0 \leq \frac{3\rho - 1}{1 - 2\rho}$	$t_w \cdot y_o \cdot p \cdot f_y \frac{2(1 - \rho)^2}{3 D_o}$
$\frac{3\rho - 1}{1 - 2\rho} \leq 0 \leq \frac{\rho}{1 - 2\rho}$	$t_w \cdot y_o \cdot p \cdot f_y \frac{8\rho(1 - 2\rho)}{3 D_o}$

Fonte: adaptado de Delesques (1968).

A força cortante média do perfil alveolar pelo método de Delesques (1969) (V_{Rm}) é dada pela Equação (46):

$$V_{Rm} \leq \begin{cases} \frac{2}{3} V_{cr} & \rightarrow V_{cr} \leq V_e \\ \frac{V_e + V_{cr}}{3} & \rightarrow V_e \leq V_{cr} \leq 2V_e \\ V_e & \rightarrow 2V_e \leq V_{cr} \end{cases} \quad (46)$$

4.2.2 Modificações de Veríssimo *et al.* (2013) no modelo de Delesques (1969)

Veríssimo *et al.* (2013) apresentam uma síntese de modelos analíticos aplicáveis aos diferentes modos de falha em perfis alveolares. No caso específico de FMAV, os autores retomam a formulação clássica de Delesques (1969), introduzindo uma alteração no cálculo da força cortante resistente ao escoamento do montante de alma (V_e). Para perfis celulares, essa versão ajustada de V_e é descrita pela Equação (47).

$$V_e \leq \frac{y_o \cdot t_w \cdot f_y}{3 p/D_o} \frac{(3 p/D_o - \sqrt{(p/D_o)^2 + 8})}{\sqrt{4 - (p/D_o - \sqrt{(p/D_o)^2 + 8})^2}} \quad (47)$$

4.2.3 Modelo analítico de Lawson, Oshatogbe e Newman (2004)

Lawson, Oshatogbe e Newman (2004) propuseram uma metodologia para avaliação da FMAV por modelagem numérica e analítica. O modelo analítico apresentado tem uma abordagem empírica baseada num modelo de bielas (*'strut' model*). O procedimento de cálculo é similar ao cálculo de uma barra comprimida, onde é calculada a força cortante resistente de plastificação e um fator de redução associado à compressão utilizando a curva 'c' da BS 5950-1:2000.

A força cortante de plastificação ($V_{v,l}$) é calculada pela Equação (48):

$$V_{v,l} = \left(\frac{2y_o}{p} \right) b_w \cdot t_w \cdot f_y \quad (48)$$

O procedimento de cálculo do fator de redução (χ_B) é definido de acordo com a BS 5950-1:2000 pelas Equações (50) a (55), adotando-se o comprimento de flambagem ($l_{ef,Lawson}$) definido pela Equação (49).

$$l_{ef,Lawson} = 0,5 \sqrt{b_w^2 + D_o^2} \quad (49)$$

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{l_{ef} \sqrt{12}}{t_w} \quad (50)$$

$$p_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (51)$$

$$\lambda_{0,B} = 0,2\pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (52)$$

$$\eta = \frac{\alpha (\lambda - \lambda_{0,B})}{1000} \quad (53)$$

com: $\alpha = 5,5$ (curva 'c' da BS 5950-1:2000)

$$\phi_B = \frac{f_y + (\eta + 1)p_e}{2} \quad (54)$$

$$\chi_B = \frac{p_e}{\phi_B + \sqrt{\phi_B^2 - p_e \cdot f_y}} \quad (55)$$

Por fim, a força cortante resistente média (V_{Rm}) é obtida pela Equação (56).

$$V_{Rm} = \chi_B \cdot V_v \quad (56)$$

4.2.4 Modificações de Vieira (2014) no modelo de Lawson, Oshatogbe e Newman (2004)

Vieira (2014) investigou o modo de falha por FMAV em vigas celulares por meio de análises numéricas a partir de 3 perfis originais, W310x21, W310x28 e W310x52, variando as geometrias e espaçamentos dos alvéolos, totalizando 45 simulações numéricas de perfis completos. Com os resultados numéricos, o autor propôs um aperfeiçoamento do modelo analítico de Lawson, Oshatogbe e Newman (2004) introduzindo dois coeficientes (C_1 e C_2) no cálculo da força cortante resistente (V_{Rm}), dada pela Equação (57).

$$V_{Rm} = C_1 \cdot C_2 \cdot \chi_B \cdot V_{v,l} \quad (57)$$

O estudo conduzido por Vieira (2014) abordou algumas variações das relações p/D_o e D_o/d_g , variando-se p/D_o de 1,20 a 1,40 e D_o/d_g de 0,57 a 0,8. Logo os coeficientes propostos são válidos somente para as relações estudadas. Dessa forma, para perfis com relações fora dessas faixas, consideraram-se os coeficientes C_1 e C_2 iguais a 1, ou seja, o modelo analítico original de Lawson. Os coeficientes adicionais, desenvolvidos por Vieira (2014), são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes adicionais de Vieira (2014).

p/D_o e D_o/d_g	C_1	C_2
$1,20 \leq p/D_o \leq 1,25$ e $0,57 \leq D_o/d_g \leq 0,65$	$-2,0267 \left(\frac{p}{D_o} \right) + 3,7082$	$-1,559 \left(\frac{D_o}{d_g} \right) + 2,1648$
$1,20 \leq p/D_o \leq 1,25$ e $0,65 < D_o/d_g \leq 0,75$		1
$1,20 \leq p/D_o \leq 1,25$ e $0,75 < D_o/d_g \leq 0,80$	1	1
$1,25 \leq p/D_o \leq 1,40$ e $0,57 < D_o/d_g \leq 0,80$	$-0,8157 \left(\frac{p}{D_o} \right) + 2,1372$	

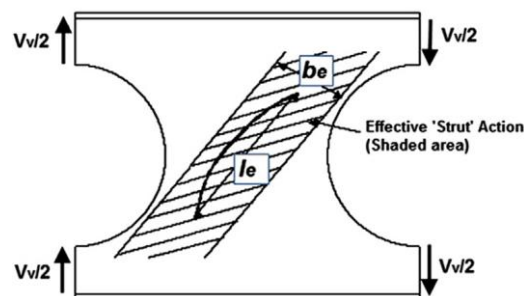
Fonte: adaptado de Vieira (2014).

O modelo proposto por Vieira (2014) para previsão da FMAV em perfis celulares foi posteriormente utilizado por Gonçalves (2015) em sua compilação de modelos analíticos para diversos modos de falha em perfis alveolares.

4.2.5 Modelo analítico de Tsavdaridis e D’Mello (2011)

Tsavdaridis e D’Mello (2011) conduziram ensaios com perfis alveolares seguidos de um estudo de variação de parâmetros com 220 simulações numéricas. A partir dos resultados, os autores propuseram uma modificação do modelo analítico de Lawson, Oshatogbe e Newman (2004), alterando somente a expressão da força cortante de plastificação. A proposta consiste em definir essa força a partir de uma biela comprimida, cuja região efetiva é apresentada pela Figura 25, sendo a largura efetiva (b_e) correspondente determinada na Equação (58).

Figura 25 - Região efetiva de compressão na alma



Fonte: adaptado de Tsavdaridis; D’Mello (2011).

$$b_e = \frac{b_w}{2} \quad (58)$$

Dessa forma, o procedimento de cálculo da força cortante resistente permanece baseado no modelo de Lawson, Oshatogbe e Newman (Tópico 4.2.3), porém utilizando a força cortante de plastificação definida pela Equação (59).

$$V_{v,t} = 2 b_e \cdot t_w \cdot f_y \quad (59)$$

4.2.6 Modelo analítico de Panedpojman; Thepchatri; Limkatanyu (2014)

Panedpojman, Thepchatri e Limkatanyu (2014) realizaram 13 ensaios experimentais de vigas celulares, incluindo vigas mistas e não mistas, com perfis simétricos e não simétricos. Além disso, fizeram diversas simulações numéricas para estudo de variação de parâmetros, que serviram para o desenvolvimento do modelo analítico de cálculo para prever o comportamento do perfil celular quanto à FMAV. A abordagem proposta pelos autores para o cálculo da força cortante de plastificação é a mesma abordagem apresentada por Tsavdaridis e D'Mello (2011) (Equações (58) e (59)). No entanto, Panedpojman, Thepchatri e Limkatanyu (2014) propuseram calcular o fator de redução associado à compressão seguindo os procedimentos da EN 1993-1-1:2000 com comprimento efetivo de flambagem ($l_{ef, Panedpojman}$) diferente, calculado pela Equação (60).

$$l_{ef, Panedpojman} = k \cdot 0,5 \sqrt{p^2 - D_o^2} \quad (60)$$

$$\text{com: } k \leq \begin{cases} 0,90 \frac{p}{D_o} \left(\frac{d_o}{d} \right)^2 \\ 1,15 \frac{d_o}{d} \\ 1,15 \end{cases}$$

Para o cálculo do fator de redução associado à compressão conforme a EN 1993-1-1:2000, é calculado o índice de esbeltez (λ) pela Equação (50) e é utilizado o conjunto de Equações (61) a (63), considerando a utilização da curva “c” de flambagem.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (61)$$

$$\phi_{EN} = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (62)$$

com $\alpha = 0,49$ (curva “c” da EN 1993-1-1:2000)

$$\chi_{EN} = \frac{1}{\phi_{EN} + \sqrt{\phi_{EN}^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (63)$$

Assim, a força cortante média resistente à FMAV (V_{Rm}) é calculada pela Equação (31).

$$V_{Rm} = \chi_{EN} \cdot V_{v,t} \quad (64)$$

4.2.7 Modelo analítico de Wang, Wang e Liu (2014)

Wang, Wang e Liu (2014) investigaram a FMAV em diversas temperaturas utilizando os métodos de Lawson, Oshatogbe, Newman (2004), Tsavdaridis e D'Mello (2011) e Bitar, Demarco e Martin (2005). O modelo de Tsavdaridis e D'Mello (2011) apresentou a melhor resposta, mas ainda precisava de ajustes para melhor precisão. Para melhorar a precisão da estimativa da força cortante de plastificação, os autores propuseram uma nova largura efetiva (b_e), obtida pela Equação (65), no entanto, foi mantido o cálculo da força cortante de plastificação pela Equação (59).

$$b_e = k \cdot \frac{b_w}{2} \quad (65)$$

com:

$$k = a_0 + a_1 \frac{D_o}{t_w}$$

$$a_0 = 0,623962 + 0,487153 \frac{p}{D_o}$$

$$a_1 = 0,072041 - 0,07283 \frac{p}{D_o} + 0,016533 \left(\frac{p}{D_o} \right)^2$$

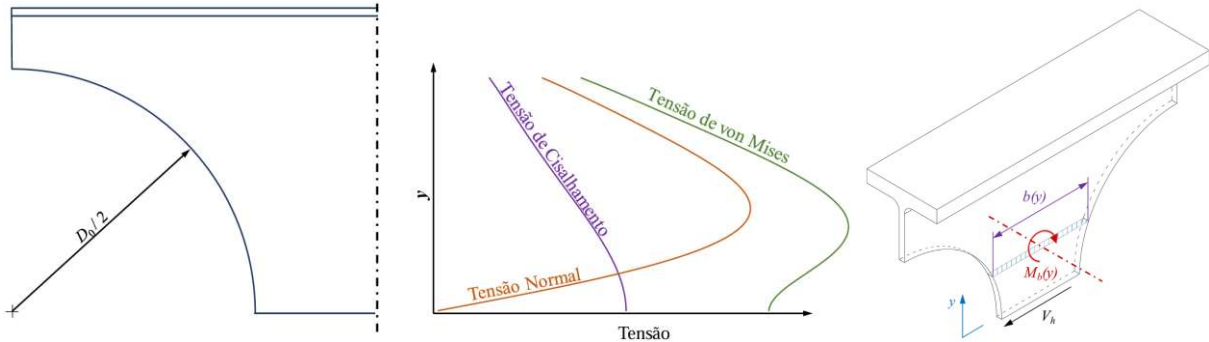
Já para melhorar a precisão do fator de redução associado à compressão, os autores propuseram a utilização das Equações (49) a (55), porém adotando o coeficiente α , da Equação (53), igual a 8.

4.2.8 Modelo analítico de Grilo *et al.* (2018)

No trabalho de Grilo *et al.* (2018) são apresentados os resultados de 14 ensaios de vigas celulares, dos quais 9 apresentaram falha por FMAV. Os resultados experimentais foram utilizados para calibração de um modelo numérico, e, a partir disso, foi conduzido um estudo de variação de parâmetros composto por 597 simulações numéricas. Com os resultados numéricos, os autores desenvolveram um modelo analítico semiempírico para o modo de falha por FMAV, que, de forma análoga ao apresentado por outros pesquisadores, considera a curva de flambagem com os trechos de plastificação, flambagem inelástica e flambagem elástica, calculando-se a força cortante de plastificação e um coeficiente de redução associado à compressão.

Grilo (2018) identificou que a tensão máxima de von Mises no montante de alma, na análise por FMAV, não ocorre na emenda soldada, mas sim a uma certa distância da emenda (ver Figura 26). Os autores determinaram a distância entre a junta soldada e o ponto de tensão máxima ($y_{p,celular}$), bem como a largura efetiva associada (b_p), para correta aplicação da Equação de von Mises. Esses parâmetros são apresentados nas Equações (66) e (67), respectivamente.

Figura 26 - Análise do início da plastificação por FMAV



Fonte: adaptado de Grilo (2018).

$$y_{p,celular} = \frac{D_o}{2} \left[0,445 \left(\frac{p}{D_o} \right)^3 - 2,578 \left(\frac{p}{D_o} \right)^2 + 4,770 \left(\frac{p}{D_o} \right) - 2,475 \right] \quad (66)$$

$$b_p = p - D_o \sqrt{1 - \frac{4y_{p,celular}^2}{D_o^2}} \quad (67)$$

Após a manipulação da expressão da tensão máxima de Von Mises e a adição de um fator de ajuste (β_G), Grilo *et al.* (2018) propuseram a Equação (68) para o cálculo da força cortante de plastificação ($V_{v,p}$).

$$V_{v,p} = \beta_G \cdot f_y \frac{t_w \cdot b_p^2}{\sqrt{3b_p^2 + 16y_{p,celular}^2}} \left(\frac{2y_o}{p} \right) \quad (68)$$

com:

$$\beta_G = \begin{cases} 1,198 - 0,42 \frac{D_o}{d_g} + \frac{p}{5D_o} & \text{para } \frac{p}{D_o} < 1,2 \\ 1,838 - 0,42 \frac{D_o}{d_g} + \frac{p}{3D_o} & \text{para } \frac{p}{D_o} \geq 1,2 \end{cases}$$

Para cálculo do fator de redução associado à compressão, os autores propuseram determinar a esbelteza do elemento (λ) e o índice de esbelteza reduzido ($\bar{\lambda}$) conforme as Equações (50) e (61), com o comprimento de flambagem ($l_{ef,Grilo}$) calculado pela Equação (69).

$$l_{ef,Grilo} = 0,5 \sqrt{p^2 - D_o^2} \quad (69)$$

O fator de redução (χ_G) é calculado pela Equação (70).

$$\chi_G = \begin{cases} \frac{\dot{a}}{\bar{\lambda}^{\dot{b}}} \leq 1 & \text{para } \bar{\lambda} \geq 1 \\ \dot{c} \cdot \dot{d}(\bar{\lambda}^{\dot{e}}) \leq 1 & \text{para } \bar{\lambda} < 1 \end{cases} \quad (70)$$

Onde \dot{a} , \dot{b} , \dot{c} , \dot{d} e \dot{e} são coeficientes de ajuste que dependem das relações dimensionais do perfil, dados na Tabela 13.

Tabela 13 - Coeficientes de ajuste \dot{a} , \dot{b} , \dot{c} , \dot{d} e \dot{e} .

$\frac{D_0}{d_g}$	$\frac{p}{D_0}$	Coeficiente de ajuste					$\frac{D_0}{d_g}$	$\frac{p}{D_0}$	Coeficiente de ajuste				
		\dot{a}	\dot{b}	\dot{c}	\dot{d}	\dot{e}			\dot{a}	\dot{b}	\dot{c}	\dot{d}	\dot{e}
0,5	1,1	0,759	1,35	1,15	0,660	3,5	0,7	1,1	0,849	1,47	1,08	0,786	4,5
	1,2	0,730	1,39	1,42	0,514	2,1		1,2	0,844	1,44	1,11	0,760	3,9
	1,3	0,780	1,40	1,16	0,672	3,5		1,3	0,903	1,39	1,15	0,785	4,0
	1,4	0,840	1,42	1,26	0,667	2,7		1,4	0,980	1,34	1,12	0,870	3,0
	1,5	0,916	1,40	1,09	0,840	5,0		1,5	1,130	1,33	-	-	-
0,6	1,1	0,798	1,42	1,14	0,700	3,5	0,8	1,1	0,888	1,46	1,09	0,815	4,0
	1,2	0,791	1,42	1,13	0,700	3,8		1,2	0,901	1,42	1,14	0,790	3,5
	1,3	0,836	1,40	1,10	0,760	4,5		1,3	1,020	1,42	-	-	-
	1,4	0,909	1,36	1,15	0,790	3,3		1,4	1,175	1,42	-	-	-
	1,5	0,970	1,31	1,09	0,890	4,5		1,5	1,285	1,36	-	-	-

Fonte: adaptado de Grilo *et al.* (2018)

Por fim, a força cortante resistente do perfil (V_{Rm}) é calculada pela Equação (71):

$$V_{Rm} = V_{v,p} \cdot \chi_G \quad (71)$$

4.2.9 Modelo de Shamass e Federico Guarracino (2020)

Shamass e Guarracino (2020) conduziram uma investigação numérica sobre a resistência à FMAV em perfis celulares fabricados com aço comum e de alta resistência. O estudo incorporou os resultados experimentais apresentados por Grilo *et al.* (2018) e por Tsavdaridis e D'Mello (2011) para a calibração e validação dos modelos numéricos. Além disso, os autores propuseram um novo modelo analítico para a predição do comportamento da FMAV, fundamentado essencialmente no modelo de Lawson *et al.* (2006). No entanto, diferentemente das abordagens anteriores, que usualmente determinavam a força cortante de plastificação e um coeficiente de redução associado à compressão, Shamass e Guarracino (2020) formularam a força cortante resistente com base direta na teoria de flambagem de Euler, contemplando um modo de flambagem com duas semi-ondas.

Na formulação proposta, os autores consideraram a resistência do montante de alma como a de uma barra de seção retangular comprimida ao longo de uma de suas diagonais, como ilustrado na Figura 25. A largura equivalente (b_e) é definida pela Equação (72), enquanto a inclinação corrigida (α') é determinada pela Equação (73). Por fim, o comprimento efetivo (\bar{l}_o) é obtido pela Equação (74).

$$b_e = \frac{d_g \cdot p - \frac{\pi}{4} D_o^2}{6 d_g} \quad (72)$$

$$\alpha' = \text{sen}^{-1} \left(\frac{D_o + b_e}{p} \sqrt{\frac{p^2 - D_o^2}{b_e^2 + 2D_o b_w + b_w^2}} \right) \quad (73)$$

$$\bar{l}_o = \frac{d_g + D_o}{2 \cdot \text{sen } \alpha'} \quad (74)$$

A carga crítica de flambagem, utilizando a analogia de Euler, proposta por Shamass e Guarracino (2020) (Q_c), é obtida pela Equação (75).

$$Q_c = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot b_e \cdot t_w^2}{3(\xi \cdot \bar{l}_o)^2} \quad (75)$$

com: $\xi = 20 \frac{t_w}{d_g}$

Por fim, a força cortante média resistente à FMAV do perfil (V_{Rm}) é calculada pela Equação (76).

$$V_{Rm} = 2 \frac{Q_c}{p} (d_g - t_f) \cos \alpha' \quad (76)$$

4.3 Descrição da modelagem numérica e estudo de variação de parâmetros

Neste item será apresentada uma breve descrição da modelagem numérica e das características do estudo de variação de parâmetros.

4.3.1 Descrição do modelo numérico

Diversos autores investigaram a FMAV por meio de simulações numéricas, em que duas estratégias de modelagem se destacam: a modelagem do perfil completo e a de um único montante de alma. A modelagem de um único montante de alma é mais interessante, pois, além de isolar o fenômeno de FMAV e possuir menor custo computacional, esses modelos são menos

sensíveis aos efeitos de borda, portanto, ideais para estudos de variação de parâmetros em perfis celulares (Grilo *et al.*, 2018; Limbachiya e Shamass, 2021; Saternus, 2022).

No ARTIGO 1 foi realizado um estudo numérico sobre o fenômeno de FMAV em perfis alveolares, no qual diferentes estratégias de modelagem de um único montante de alma propostas na literatura foram avaliadas com base nos resultados experimentais de 3 autores (Grilo *et al.*, 2018; Sakiyama, 2018; Vieira, 2015). Entre as alternativas analisadas, destacou-se uma estratégia que apresentou simultaneamente boa concordância com os ensaios e baixo custo computacional. Em razão desse bom desempenho, essa estratégia de modelagem foi adotada no presente trabalho, e suas principais características são descritas a seguir.

O procedimento de análise consistiu inicialmente em uma análise elástica de flambagem do modelo de um único montante de alma, a partir da qual foi obtido o modo associado ao menor autovalor positivo. Esse modo foi então adotado como imperfeição geométrica inicial na análise não linear conduzida pelo método de Riks, para a determinação da força cortante máxima associada à FMAV.

A geometria de um único montante de alma, o modelo constitutivo do aço e o sistema de eixos de referência utilizados são apresentados na Figura 27. As condições de contorno empregadas são descritas na Tabela 14. A força cortante foi aplicada distribuída ao longo da alma direita do perfil.

Figura 27 - Parâmetros do modelo de um único montante de alma.

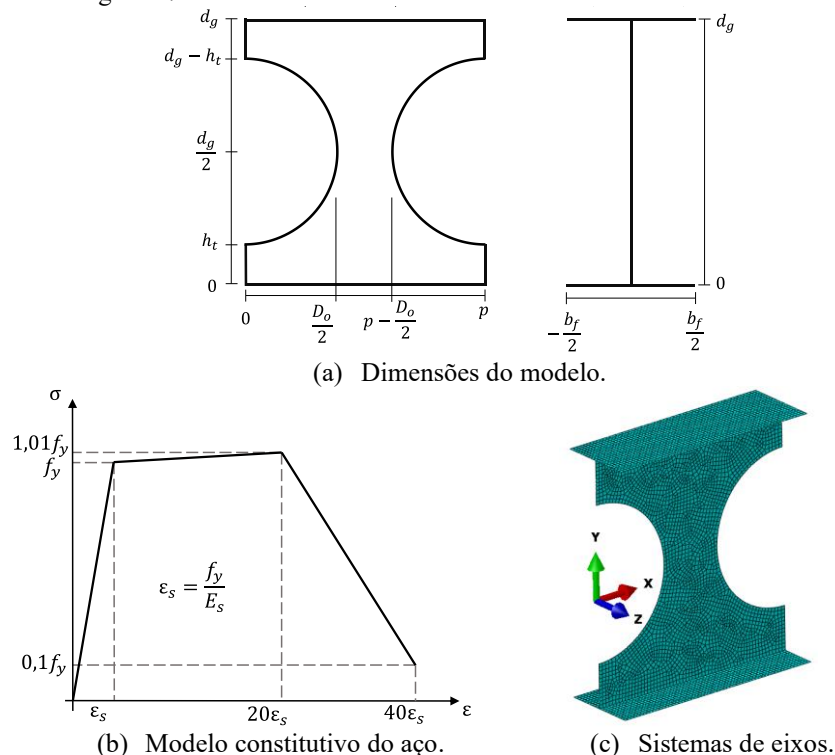


Tabela 14 - Condições de contorno do modelo de um único montante de alma.

Condição de Contorno	ux	uy	uz	rx	ry	rz
Alma Esquerda	X	X	X	X		
Mesa Esquerda	X	X		X	X	
Alma Direita			X	X		
Mesa Direita				X	X	

X – Restringido
u representa a translação e r representa a rotação em torno dos eixos

Para a discretização do modelo, foram utilizados elementos de casca quadrangulares de quatro nós com integração reduzida (S4R). O tamanho médio dos elementos é definido como o menor valor entre 10 mm, $b_w/5$ e $d_g/40$, assegurando discretização compatível com perfis de pequena altura e montantes de alma de dimensões reduzidas. Por fim, a imperfeição geométrica inicial, de curvatura da alma, é introduzida com amplitude igual a $d_g/100$.

4.3.2 Estudo de variação de parâmetros

Para a realização do estudo de variação de parâmetros, adotou-se como referência a série de perfis VCS (ArcelorMittal, 2025), que apresenta 113 perfis de alma cheia customizados para o máximo rendimento estrutural em perfis alveolares. A utilização desse conjunto amplo e representativo de geometrias possibilitou avaliar o comportamento à FMAV em uma gama diversa de perfis com seções de diferentes tamanhos, assegurando relevância prática e aplicabilidade dos resultados obtidos.

As variáveis analisadas no estudo foram a razão de expansão (d_g/d), a relação passo/diâmetro (p/D_o) e o tipo de aço. As relações d_g/d e p/D_o foram avaliadas no intervalo de 1,1 a 1,5, em incrementos de 0,1, abrangendo uma faixa representativa das soluções usuais na prática estrutural. Quanto ao material, consideraram-se dois aços estruturais – ASTM A36 e USI-CIVIL-350 – com resistência ao escoamento de 250 MPa e 350 MPa, respectivamente, de modo a examinar a influência do tipo de aço na resposta prevista pelos modelos analíticos.

Os diâmetros dos alvéolos não foram variáveis no estudo. Em vez disso, adotaram-se dimensões intermediárias entre as opções viáveis para fabricação, definidas em função da altura original do perfil. Os valores correspondentes aos diâmetros adotados para cada altura estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Diâmetro dos alvéolos utilizados na modelagem em função da altura original do perfil.

d (mm)	D_o (mm)	d (mm)	D_o (mm)	d (mm)	D_o (mm)
300	165	550	300	800	430
350	190	600	325	850	460
400	215	650	350	900	485
450	245	700	380	950	515
500	270	750	405	1000	540

Ao todo, foram executadas 5650 simulações numéricas, organizadas em 50 combinações paramétricas (5 relações $p/D_o \times 5$ relações $d_g/d \times 2$ tipos de aços), cada uma composta pelos 113 perfis do catálogo VCS. Esse conjunto extenso de simulações possibilita avaliar de forma abrangente os efeitos geométricos e mecânicos sobre o mecanismo de FMAV, permitindo uma análise crítica e consistente do desempenho dos modelos analíticos disponíveis na literatura.

4.4 Resultados e discussão

Para avaliar o desempenho dos modelos analíticos analisados, foram implementadas todas as combinações geométricas e mecânicas consideradas no estudo de variação de parâmetros nas formulações, resultando em valores estimados da força cortante à FMAV. Esses resultados foram comparados diretamente aos valores numéricos obtidos nas simulações numéricas, conforme ilustrado na Figura 28. Dada a elevada quantidade de dados associados a cada modelo analítico, na Figura 29 destaca-se visualmente o comportamento global de cada modelo.

Realizando uma análise conjunta dos resultados, observa-se que os modelos analíticos apresentam diferenças consideráveis entre si ao estimar a capacidade última à FMAV. Essa variação entre as formulações é coerente com as observações de Saturnus (2022) e de Shamass e Guarracino (2020), que também identificaram comportamentos distintos entre os principais modelos disponíveis na literatura. Esses contrastes reforçam a necessidade de avaliar criticamente o desempenho de cada abordagem em perfis celulares.

Figura 28 - Comparação dos resultados dos modelos analíticos com numéricos

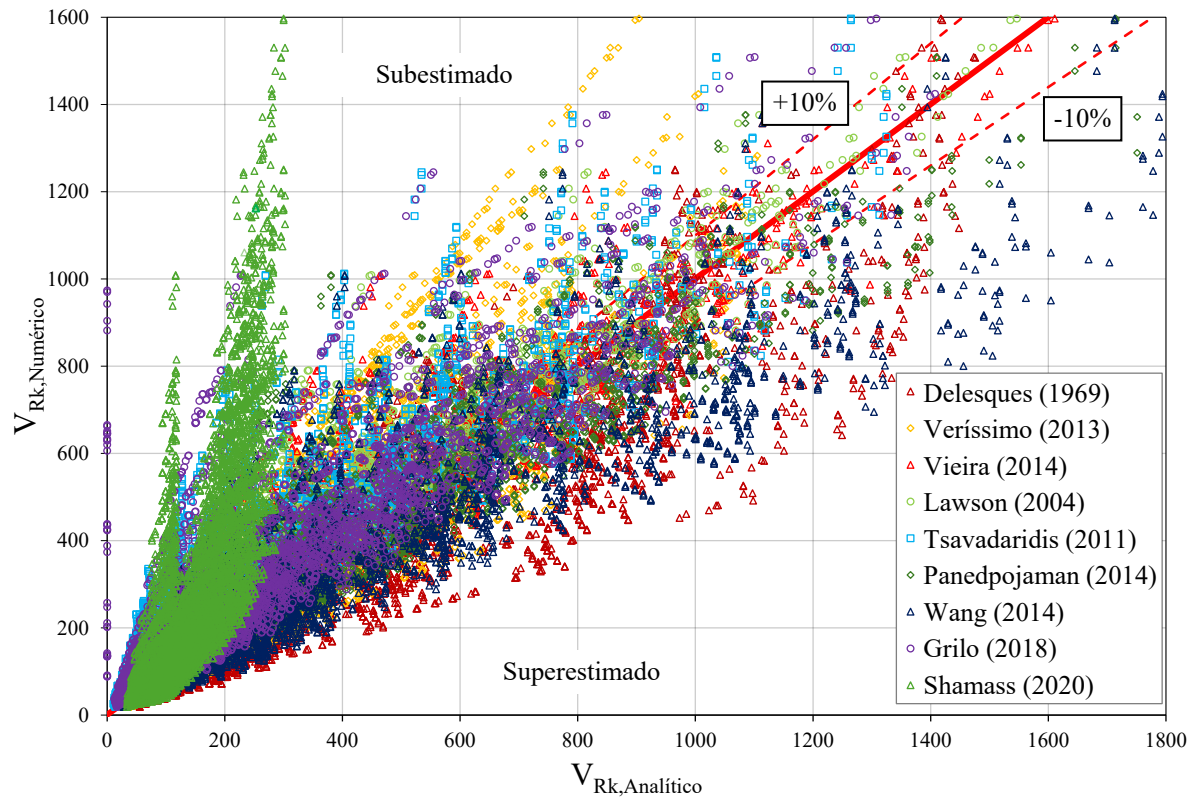
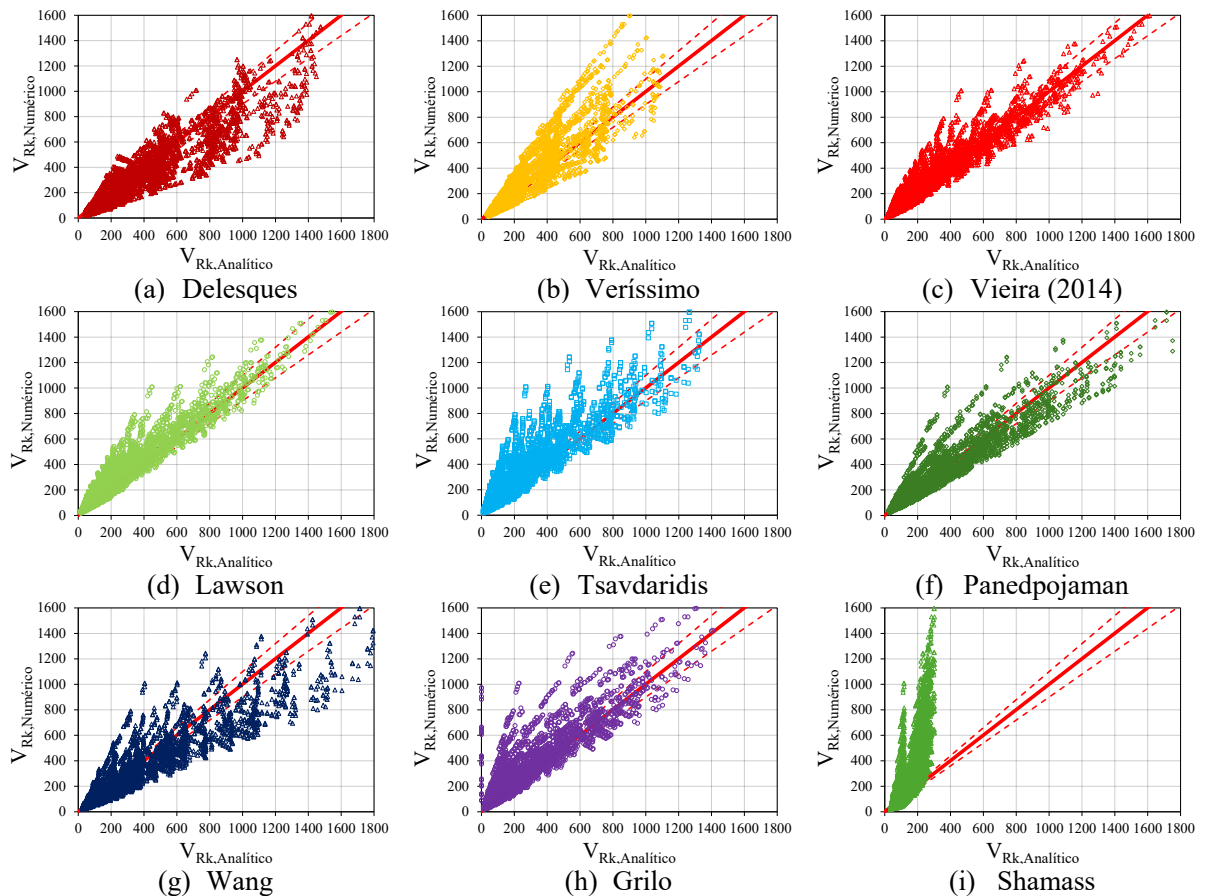


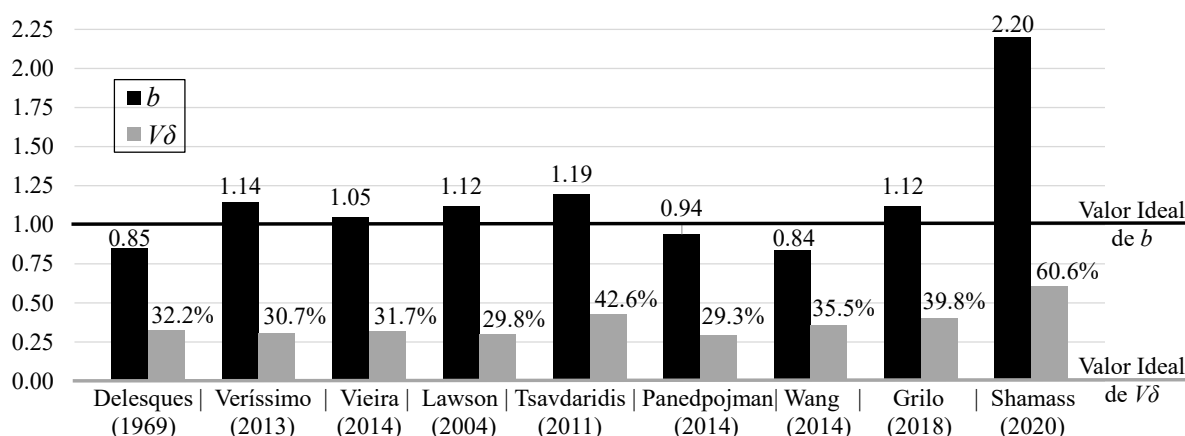
Figura 29 - Resultados dos modelos analíticos com numéricos.



Na Figura 28 (ou Figura 29h), observa-se que alguns perfis do modelo de Grilo resultaram em valores nulos de capacidade resistente. Esse comportamento ocorreu porque determinadas geometrias estão fora do domínio de validade da formulação, o que impede o modelo de estimar a capacidade resistente. Nessas situações, adotou-se resistência igual a zero e, para as análises estatísticas, tais amostras foram excluídas.

Após essa avaliação visual inicial, realizou-se a análise estatística das relações entre os resultados numéricos e analíticos, com base no cálculo do fator de correção médio (b) e do coeficiente de variação dos erros ($V\delta$), conforme prescrito pela EN 1990:2009 (Anexo D). Os valores obtidos para esses parâmetros em cada modelo analítico são apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Análise estatística comparativa dos resultados numéricos em relação aos modelos analíticos.



Todos os modelos analíticos avaliados apresentam coeficientes de variação elevados, o que indica uma alta dispersão em relação aos resultados numéricos. Dessa forma, embora alguns modelos tenham apresentado valores satisfatórios de fator de correção médio, a elevada variabilidade evidencia que tais expressões ainda não são suficientemente robustas para estimar com boa aproximação a capacidade última do perfil à força cortante por FMAV em perfis celulares.

Por um outro lado, Valente (2018) adota uma abordagem baseada no modelo de Grilo *et al.* (2018) e propõe um modelo analítico para estimar a capacidade última à força cortante por FMAV em perfis castelados, obtendo resultados satisfatórios (ARTIGO 2). Esse desempenho sugere que a estrutura conceitual adotada por Grilo *et al.* (2018) possui potencial, desde que acompanhada de uma revisão ou recalibração dos coeficientes estatísticos originalmente propostos pelo autor.

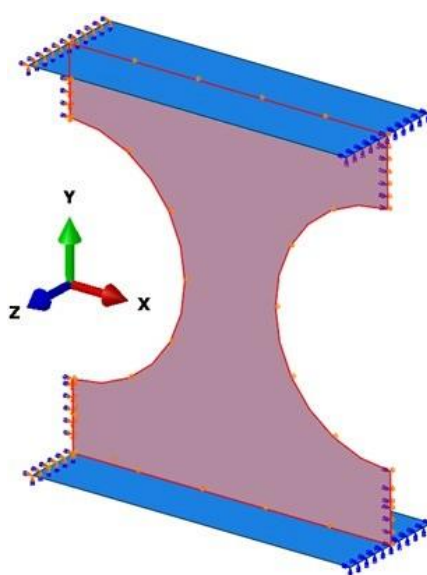
Além disso, uma vantagem relevante dessa abordagem, quando comparada ao modelo de Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014), é que as expressões não dependem da altura do perfil original. Assim, a predição da FMAV pode ser realizada exclusivamente a partir das geometrias do perfil alveolar, sem a necessidade de conhecer o perfil de alma cheia que lhe deu origem.

4.5 Ajuste estatísticos no modelo de Grilo *et al.* (2018)

No modelo proposto por Grilo *et al.* (2018), a resistência média à FMAV é obtida pelo produto da força cortante de plastificação por um coeficiente de redução associado à compressão. Assim, para a proposição de modificações adequadas ao modelo, torna-se necessário avaliar separadamente esses dois componentes. Com esse objetivo, foram realizadas simulações numéricas adicionais destinadas a isolar o efeito da plastificação do montante de alma.

As simulações de plastificação seguiram os mesmos procedimentos de modelagem e análise descritos anteriormente, incluindo a análise de flambagem e a introdução de imperfeições geométricas iniciais. Contudo, a fim de impedir a ocorrência de instabilidade global durante a análise não linear pelo método de Riks, a alma teve a translação no eixo z restringida, conforme ilustrado na Figura 31. Ao todo, foram realizadas 5650 simulações numéricas considerando exclusivamente o comportamento plástico do montante de alma.

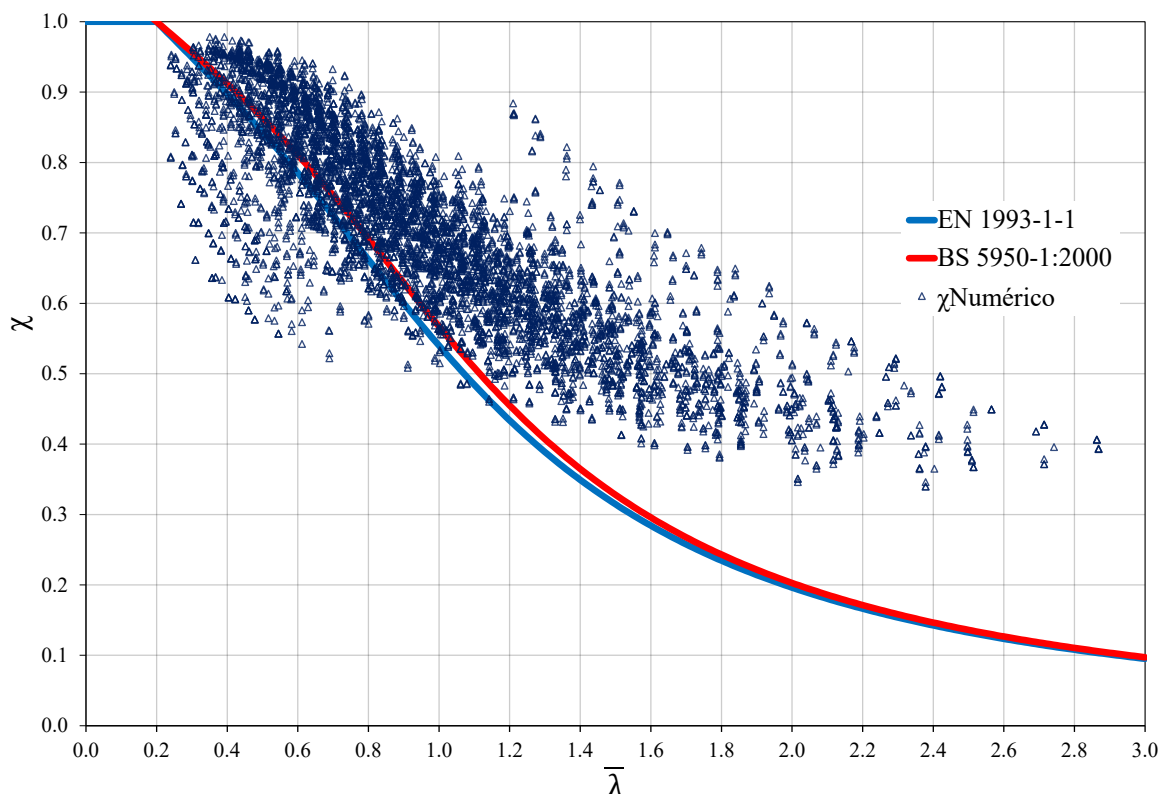
Figura 31 – Representação das condições de contorno no modelo com alma travada – translação no eixo Z impedida.



A partir dos resultados obtidos, o coeficiente de redução associado à compressão foi estimado pela razão entre a força cortante resistente à FMAV e a força cortante de plastificação. Na Figura 32 são apresentados os valores desse coeficiente em função da esbeltez reduzida segundo o Modelo de Grilo *et al.* (2018), incluindo os resultados obtidos pelas simulações numéricas e as curvas propostas pelas normas BS 5950-1:2000 e EN 1993-1-1:2000.

O confronto dos resultados evidencia que as curvas normativas da BS 5950-1:2000 e da EN 1993-1-1:2000 não são adequadas para avaliação da FMAV, uma vez que apresentam dispersão considerável em relação aos resultados numéricos, indicando que os modelos analíticos que se baseiam nessas curvas não são ideais. Em função dessa dispersão, Grilo *et al.* (2018) propuseram coeficientes de ajuste com o objetivo de adequar a curva de flambagem à geometria dos perfis celulares, o que justifica a adoção de seu modelo como base para as modificações propostas visando à melhoria da precisão.

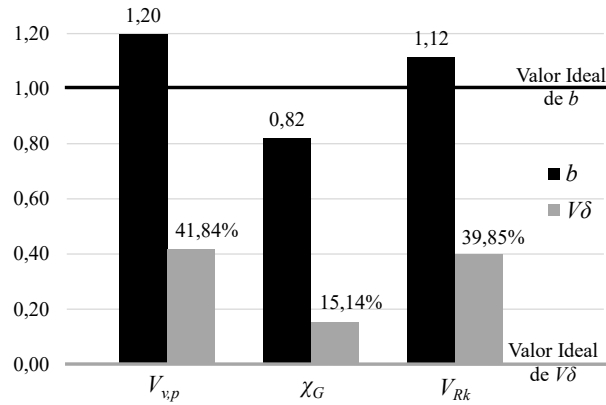
Figura 32 - Esbeltez reduzida x Coeficiente de redução associado à compressão.



Em seguida, os resultados do modelo de Grilo *et al.* (2018) foram avaliados estatisticamente com base nos procedimentos estabelecidos na EN 1990:2009 (Anexo D), com o objetivo de verificar a necessidade de correções na força cortante de plastificação e/ou no coeficiente de

redução associado à compressão. Os resultados dessa avaliação estatística são apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Análise estatística: Modelo de Grilo



A análise individual dos resultados indica que o modelo de Grilo *et al.* (2018) subestima a capacidade resistente à plastificação do perfil, apresentando elevada dispersão, com coeficiente de variação dos erros de 41,84%. Por sua vez, o coeficiente de redução associado à compressão é superestimado e apresenta variabilidade relevante, com coeficiente de variação dos erros de 15,14%. Dessa maneira, verifica-se a necessidade de modificações tanto na equação para obtenção da força de plastificação quanto na equação para obtenção do coeficiente de redução.

A proposta para modificação da equação para obtenção da força cortante de plastificação baseia-se na revisão do cálculo do ($y_{p,celular}$) e do fator de ajuste β_G , conforme apresentado nas Equações (77) e (78), respectivamente.

$$y_{p,celular} = \frac{D_o}{2} \left[\frac{1}{1 + e^{-z}} \right] \quad (77)$$

com:
$$z = 2,906 - 0,201 \frac{p}{D_o} + 0,614 \frac{D_o}{d_g} - 4,240 \frac{p}{d_g}$$

$$\beta_G = \begin{cases} -9,831 + 12,3 \frac{D_o}{d_g} - 3,066 \frac{p}{D_o} & \text{para } \frac{p}{D_o} < 1,2 \\ 5,581 - 1,859 \frac{D_o}{d_g} - 2,667 \frac{p}{D_o} & \text{para } \frac{p}{D_o} \geq 1,2 \end{cases} \quad (78)$$

Para a modificação do fator de redução associado à compressão, foi proposta uma nova tabela contendo diferentes coeficientes de ajuste \dot{a} , \dot{b} , \dot{c} , \dot{d} e \dot{e} (Tabela 16):

Tabela 16 - Coeficientes de ajuste \hat{a} , \hat{b} , \hat{c} , \hat{d} e \hat{e} propostos.

$\frac{D_0}{d_g}$	$\frac{p}{D_0}$	Coeficiente de ajuste					$\frac{D_0}{d_g}$	$\frac{p}{D_0}$	Coeficiente de ajuste				
		\hat{a}	\hat{b}	\hat{c}	\hat{d}	\hat{e}			\hat{a}	\hat{b}	\hat{c}	\hat{d}	\hat{e}
0,5	1,1	0,869	0,025	0,919	0,6592	0,902	0,7	1,1	0,647	0,425	2,089	0,303	0,5122
	1,2	0,745	0,057	1,585	0,3972	0,603		1,2	0,626	0,543	3,743	0,1733	0,3137
	1,3	0,681	0,123	2,972	0,2219	0,3798		1,3	0,645	0,652	7,284	0,0918	0,1811
	1,4	0,662	0,246	6,051	0,1148	0,2254		1,4	0,707	0,737	15,4	0,0451	0,0985
	1,5	0,686	0,466	13,384	0,0551	0,126		1,5	0,826	0,782	35,366	0,0205	0,0505
0,6	1,1	0,725	0,128	1,33	0,4698	0,697	0,8	1,1	0,62	0,921	3,559	0,1768	0,3578
	1,2	0,66	0,218	2,339	0,2758	0,4461		1,2	0,637	0,882	6,497	0,0985	0,2098
	1,3	0,64	0,35	4,467	0,15	0,2689		1,3	0,696	0,794	12,883	0,0508	0,1159
	1,4	0,661	0,527	9,269	0,0756	0,1528		1,4	0,811	0,672	27,753	0,0243	0,0604
	1,5	0,727	0,747	20,89	0,0353	0,0818		1,5	1,005	0,535	64,943	0,0108	0,0296

Adotando-se o mesmo procedimento de cálculo do modelo de Grilo *et al.* (2018), incorporando as modificações propostas, torna-se possível estimar a força cortante de plastificação, o coeficiente de redução associado à flambagem e a força cortante resistente à FMAV. Na Figura 34 apresentam-se os resultados da força cortante de plastificação, cujos valores analíticos ($V_{v,p,Analítico}$) foram confrontados com os resultados das simulações numéricas ($V_{pl,Numérico}$), considerando o modelo de Grilo *et al.* (2018) e o modelo modificado. A Figura 35 ilustra os resultados do coeficiente de redução associado à compressão (χ), enquanto a Figura 36 apresenta os resultados da força cortante resistente à FMAV (V_{Rm}).

Figura 34 - Resultados analíticos x Resultados numéricos – Força cortante de plastificação

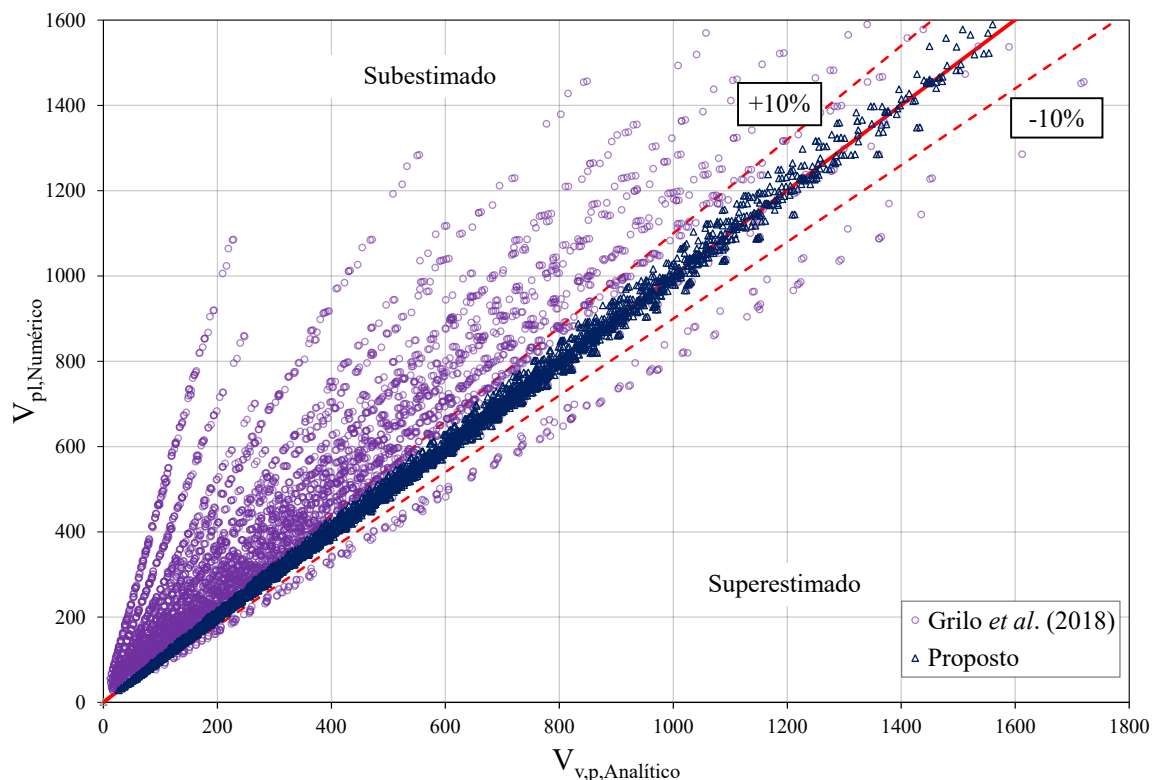


Figura 35 - Resultados analíticos x Resultados numéricos – Coeficiente de redução associado à flambagem

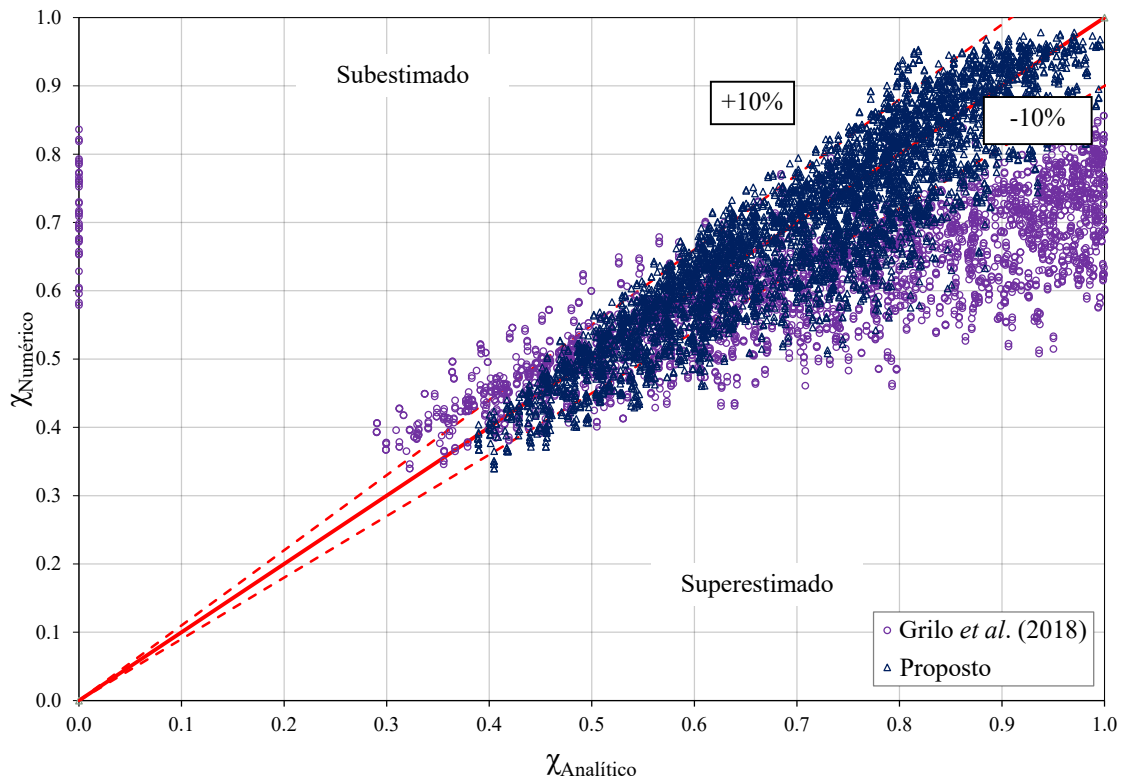
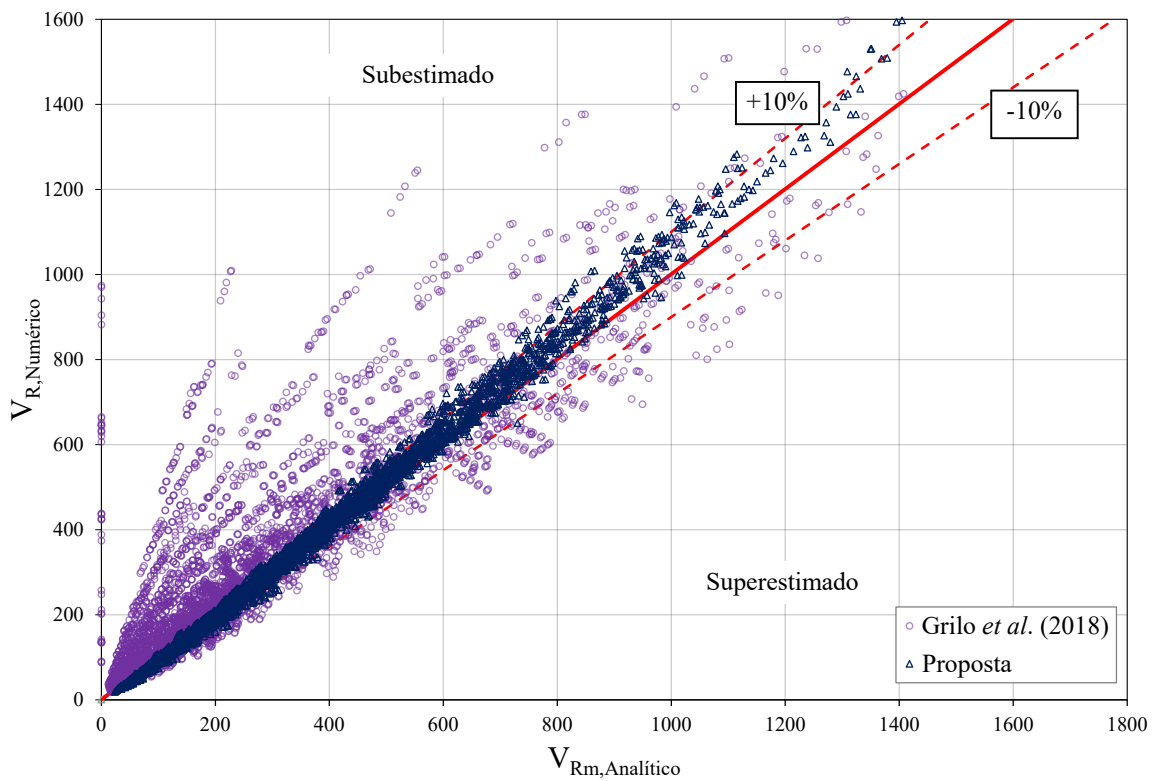
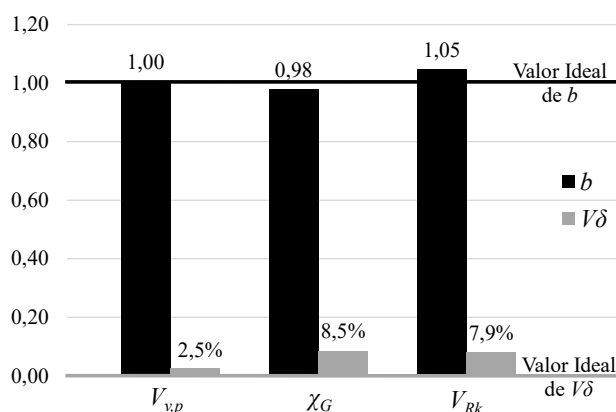


Figura 36 - Resultados analíticos x Resultados numéricos – Força cortante resistente a FMAV



A avaliação estatística dos resultados obtidos pelo modelo modificado, em comparação com os resultados das simulações numéricas, foi realizada com base nos procedimentos estabelecidos no Anexo D da EN 1990:2009, sendo os resultados apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Análise estatística: Modelo modificado



O modelo modificado proposto apresenta boa precisão da força cortante de plastificação, com fator de correção médio igual a 1,0 e coeficiente de variação dos erros de apenas 2,5%. Para o coeficiente de redução associado à compressão, observa-se um fator de correção médio de 0,98 e uma dispersão superior à verificada para a força cortante de plastificação, embora ainda com coeficiente de variação dos erros considerado satisfatório, de 8,5%. De forma global, o modelo apresenta comportamento favorável à segurança, uma vez que subestima a capacidade resistente do perfil, resultando em fator de correção médio de 1,05 e coeficiente de variação dos erros de 7,9%.

4.6 Modelo característico e de cálculo

Os valores característico e de cálculo da resistência à força cortante associada à FMAV foram obtidos a partir do valor médio do modelo analítico proposto, seguindo a metodologia apresentada no Anexo D da EN 1990:2009. Esses valores são definidos pelas Equações (79) e (80).

$$V_{Rk} = a_k \cdot V_{Rm} \quad (79)$$

$$V_{Rd} = a_d \cdot V_{Rm} \quad (80)$$

Em razão da complexidade envolvida na consideração individual das tolerâncias geométricas das dimensões dos perfis alveolares, optou-se por representar a variabilidade geométrica de forma global. Considerando que a resistência ao cisalhamento está diretamente relacionada ao produto entre a tensão de escoamento do aço e uma área resistente da seção, foram admitidos

coeficientes de variação relativos à resistência ao escoamento do aço ($V_{X_{fy}}$) e às propriedades geométricas ($V_{X_{geo}}$), este último, referente a uma área, para a determinação da variabilidade da resistência básica (V_{rt}). Devido à falta de dados estatísticos específicos sobre a variabilidade dimensional dos parâmetros geométricos de perfis celulares até o presente momento, foram adotados os valores recomendados pelo JCSS Probabilist Model Code – Part III: Resistance Models, originalmente propostos para perfis laminados, que são próximos aos relatados por Melcher *et al.* (2004).

Tendo em vista o grande número de simulações realizadas neste trabalho, foram utilizadas as os fatores de conversão do modelo médio para os níveis característico (a_k) e de cálculo (a_d) foram obtidos com base nas Equações (81) e (82). A partir desses coeficientes, o fator de segurança implícito do modelo pode ser determinado pela Equação (83).

$$a_k = b \cdot \exp(-1,64 Q - 0,5Q^2) \quad (81)$$

$$a_d = b \cdot \exp(-3,04 Q - 0,5Q^2) \quad (82)$$

$$\gamma_{model} = \frac{a_k}{a_d} \quad (83)$$

Os coeficientes obtidos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros para definição do modelo analítico.

Modelo analítico	b	V_δ	$V_{X_{fy}}$	$V_{X_{geo}}$	V_{rt}	V_r	Q	a_k	a_d	γ_{model}
V_{Rm} [Eq. (37)]	1,05	7,9%	7,0%	3,2%	7,7%	11,0%	0,110	0,87	0,74	1,17

Por fim, substituindo a_k e a_d nas Equações (79) e (80), obtêm-se as expressões da resistência à força cortante associada à FMAV nos níveis característico e de cálculo, apresentadas nas Equações (84) e (85).

$$V_{Rk} = 0,87 \cdot V_{v,p} \cdot \chi_G \quad (84)$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{model}} = 0,74 \cdot V_{v,p} \cdot \chi_G \quad (85)$$

O procedimento apresentado tem como objetivo principal demonstrar a aplicação da metodologia da EN 1990:2009 (Anexo D) para a obtenção de modelos característicos e de cálculo a partir de um modelo médio, que podem ser aplicados em projetos de engenharia. Tendo em vista os procedimentos de corte e solda para a fabricação dos perfis alveolares, é importante caracterizar a variabilidade dos parâmetros geométricos típicos (passo, comprimento na emenda do montante de alma, dimensão das aberturas), o que não está disponível na literatura e não fez parte do escopo do presente trabalho.

4.7 Conclusões

Nesse estudo foi realizada uma compilação dos principais modelos analíticos disponíveis na literatura para prever a capacidade última de perfis celulares à FMAV. Em seguida, conduziu-se um estudo numérico abrangente, composto por 5650 simulações numéricas utilizando-se perfis da série VCS (ArcelorMittal, 2025), variando-se as relações geométricas d_g/d e p/D_o e tipos de aço. Os resultados numéricos foram comparados com as estimativas dos modelos analíticos correspondentes, empregando as análises estatísticas recomendadas pela EN 1990:2009.

Os resultados mostraram que os principais modelos analíticos da literatura apresentam estimativas discrepantes entre si, fato já apontado por Saternus (2022) e por Shamass e Guarracino (2020). Além disso, o presente estudo demonstrou que, para perfis celulares, essas formulações não predizem de forma precisa a resistência última à FMAV, uma vez que todos os modelos apresentaram elevada dispersão, com coeficientes de variação dos erros ($V\delta$) superiores a 29%.

Partindo do modelo analítico mais promissor identificado na literatura, foram realizadas adaptações com o objetivo de adequá-lo ao conjunto numérico desenvolvido neste estudo. Após a revisão e recalibração dos coeficientes estatísticos do modelo de Grilo *et al.* (2018), a formulação ajustada passou a prever a força cortante à FMAV com fator médio de 1,05 e coeficiente de variação dos erros de apenas 7,9%, evidenciando elevado grau de consistência. Esses resultados contribuem para suprir lacunas existentes, ao disponibilizar uma base numérica abrangente calibrada para perfis alveolares, permitindo avaliação mais rigorosa da qualidade e das limitações das formulações existentes. Ademais, os achados fornecem subsídios técnicos para futuras revisões normativas, ao indicar um procedimento de cálculo capaz de estimar de forma consistente a força cortante resistente para o modelo de falha FMAV para perfis celulares.

Referências

- ARCELORMITTAL. *Vigas Celulares ArcelorMittal - Catálogo VCS*. Brasil: [s. d.], 2025. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/software-vca>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- BITAR, D.; DEMARCO, T.; MARTIN, P. O. *Steel and non-composite cellular beams - Novel approach for design based on experimental studies and numerical investigations*. 2005. Anais [...]. [S. l.]: Eurosteel, 2005.

- BRINKHUS, R. N. *Análise de Vigas Casteladas e Vigas Casteladas Mistas*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/115556>.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BS 5950-1:2000. Structural use of steelwork in building - Part 1: *Code of practice for design* - Rolled and welded sections. London: [s. d.], 2000.
- DELESQUES, R. *Le Calcul des Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 41–51, 1969.
- DELESQUES, R. *Stabilité des Montants de Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 3, no 3, p. 26–33, 1968.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1990:2009. Eurocode - *Basis of structural design*. Brussels: [s. d.], 2009.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1993-1-1: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: *General rules and rules for buildings*. Brussels: [s. d.], 2005.
- GONÇALVES, A. B. *Modelo analítico para dimensionamento de vigas alveolares mistas de aço e concreto*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6500>.
- GRILO, L. F. *et al. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 148, p. 525–541, 2018.
- GRILO, L. F. *Formulação para Determinação da Força Cortante Resistente de Flambagem do Montante de Alma em Vigas Celulares de Aço*. 2018. PhD Thesis - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUOS-B32NVX>.
- JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY (JCSS). *JCSS Probabilist Model Code - Part III: Resistance Models*. Zurich: 2002.
- LAWSON, R. M. *et al. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 62, no 6, p. 614–629, 2006.
- LAWSON, R. M.; OSHATOGBE, D.; NEWMAN, G. M. *Design of FABSEC Cellular Beams in Non-Composite and Composite Applications: For Both Normal Temperature and Fire Engineering Conditions to SCI AD 269*. Leeds: [s. d.], 2004. Disponível em: Acesso em: 10 set. 2025.
- LIMBACHIYA, V.; SHAMASS, R. *Application of Artificial Neural Networks for web-post shear resistance of cellular steel beams*. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 161, p. 107414, 2021.
- LUBKE, G. P. *Dimensionamento Otimizado de Vigas Alveolares de Aço*. 2017. Master's Thesis - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em:

https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_11049 DISSERTA%C7%C3O%20GABRIELA%20LUBKE.pdf.

- MELCHER, J. et al. *Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 60, no 3–5, p. 795–808, 2004.
- MENKULASI, F. et al. *Investigation of Web Post Compression Buckling Limit State and Stiffener Requirements in Castellated Beams*. Engineering Journal, [s. l.], vol. 54, no 1, p. 21–44, 2017.
- PANEDPOJAMAN, P.; THEPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. *Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams*. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 76, p. 92–104, 2014.
- SAE-LONG, W. et al. *Behavior and design implications of web-post shear failure in cellular beams*. Results in Engineering, [s. l.], vol. 27, p. 106709, 2025.
- SAKIYAMA, E. K. H. *Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento em Vigas Casteladas Soldadas*. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/20940>.
- SANTOS, E. V. et al. *Web-post buckling behaviour of composite beams with large elliptically-based web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 229, p. 109483, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X25001610>.
- SATERNUS, P. *Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling*. Advances in Science and Technology Research Journal, [s. l.], vol. 16, no 1, p. 213–230, 2022.
- SHAMASS, R.; GUARRACINO, F. *Numerical and analytical analyses of high-strength steel cellular beams: A discerning approach*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 166, p. 105911, 2020.
- TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. *Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 67, no 10, p. 1605–1620, 2011.
- VALENTE, M. T. *Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Casteladas de Aço em Situação de Incêndio com Ênfase nos Modos de Falha por Plastificação*. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/24521>.
- VERÍSSIMO, G. de S. et al. *Estados Limites Aplicáveis às Vigas Alveolares de Aço*. Revista da Estrutura de Aço (Centro Brasileiro da Construção em Aço), [s. l.], vol. 2, no 2, p. 126–144, 2013.
- VIEIRA, H. C. *Análise Numérica da Flambagem do Montante de Alma devida ao Cisalhamento em Vigas de Aço Celulares*. 2014. Master's Thesis - Universidade Federal

de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em:
<https://hdl.handle.net/1843/BUOS-9MBHXF>.

VIEIRA, W. B. *Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma em Vigas Casteladas de Aço*. 2015. PhD Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6741>.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. *Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire*. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 85, p. 441–455, 2014.

WARD, J. K. *Design of composite and non-composite cellular beams*. Reprinted 1994ed. Ascot: The Steel Construction Institute, 1990.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Este trabalho teve como objetivo apresentar e recomendar modelos analíticos para a predição da capacidade de perfis alveolares de diferentes padrões frente ao modo de falha por flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV), identificando as abordagens mais adequadas para perfis castelados e celulares. Para isso, foram realizadas compilações de resultados experimentais de perfis que falharam por FMAV, de estratégias de modelagem numérica e de modelos analíticos disponíveis na literatura. Em seguida, investigaram-se as estratégias de modelagem numérica baseadas no método dos elementos finitos para representação da FMAV, culminando no aprimoramento de um modelo numérico de um único montante de alma aplicável a perfis castelados e celulares, validado a partir dos resultados experimentais de Vieira (2015), Sakiyama (2018) e Grilo *et al.* (2018).

A partir do modelo numérico calibrado, foi conduzido um estudo de variação de parâmetros abrangente composto por 6328 simulações numéricas, sendo 678 referentes a perfis castelados e 5650 a perfis celulares, considerando a série de perfis VCS (ArcelorMittal, 2025). Os resultados numéricos foram confrontados com as previsões dos principais modelos analíticos da literatura, sendo ainda realizada uma avaliação estatística com base no Anexo D da EN 1990:2009, para quantificação da precisão dos modelos investigados. Com base nessa análise, verificou-se a necessidade de modificação do modelo analítico de Grilo *et al.* (2018) para perfis celulares, visando à melhoria da precisão. Por fim, foram identificados os modelos analíticos mais adequados para a predição da FMAV em perfis castelados e celulares.

Na etapa de calibração do modelo numérico, destacaram-se duas estratégias de modelagem de um único montante de alma, ambas baseadas nas condições de contorno propostas por Justino *et al.* (2020), utilizando elementos de casca S4R e imperfeição geométrica inicial de $d_g/100$. A diferença entre as estratégias refere-se ao tamanho médio do elemento finito: no grupo J6 adotou-se o menor valor entre 10 mm, $d_g/40$ e $b_w/10$, enquanto no grupo J4 utilizou-se 5 mm. O grupo J6 é mais indicado quando a prioridade é o custo computacional, apresentando razão média entre resultados numéricos e experimentais igual a 1,0, coeficiente de variação de 9,4%. Já o grupo J4 apresentou leve ganho de precisão, com razão média de 0,99 e coeficiente de variação de 9,1%, mas com maior custo computacional.

Os resultados obtidos com os modelos analíticos evidenciaram divergências relevantes entre as formulações disponíveis, tanto para perfis castelados quanto para perfis celulares, confirmando observações de Saternus (2022) e Shamass e Guarracino (2020). Para perfis castelados, o modelo proposto por Valente (2018) apresentou o melhor desempenho global, com fator médio de correção (b) de 0,96 e coeficiente de variação dos erros ($V\delta$) de 7,8%. Considerando cada um dos três padrões de corte avaliados, foram obtidos fatores médios de correção iguais a 0,96, 0,95 e 0,96 e coeficientes de variação dos erros de 8,8%, 6,7% e 7,0% para os padrões anglo-saxão, Litzka e Peiner, respectivamente. No entanto, esse modelo analítico superestima a capacidade resistente à FMAV do perfil. Por essa razão, foi proposta a aplicação de um coeficiente redutor de 0,95 aos resultados da equação original, resultando em um modelo ajustado levemente conservador. Para perfis celulares, constatou-se que nenhum dos modelos disponíveis na literatura foi capaz de prever a resistência à FMAV com coeficientes de variação dos erros inferiores a 10%, o que motivou a proposição de modificações no modelo de Grilo *et al.* (2018). O modelo modificado apresentou comportamento favorável à segurança, com fator médio de correção igual a 1,05 e coeficientes de variação dos erros de 7,9%.

Durante o processo de modificação do modelo analítico para perfis celulares, foram realizadas 5650 simulações numéricas adicionais com o objetivo de estimar a força cortante de plastificação do perfil. O coeficiente de redução associado à compressão para a FMAV foi estimado a partir dos resultados numéricos da análise completa de FMAV e da força cortante de plastificação. Os resultados indicaram que uma única curva não é suficiente para representar adequadamente esse coeficiente. Nesse sentido, o modelo de Valente (2018) e o modelo modificado de Grilo *et al.* (2018) apresentaram melhor desempenho, uma vez que consideram múltiplas curvas de flambagem em função da geometria do perfil alveolar e de seus respectivos coeficientes de ajuste.

Em função dos resultados obtidos no presente trabalho, entende-se que a abrangência dos estudos de variação de parâmetros e o tratamento estatístico realizados permitiram obter expressões semiempíricas que apresentam melhor correlação com os resultados experimentais e numéricos. Dessa forma, os modelos médios ajustados nesse trabalho representam uma contribuição para o meio técnico e fornecem subsídios para possível incorporação futura em normas técnicas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Todas as análises neste trabalho foram realizadas sob condições de temperatura ambiente. Para ampliar o alcance do presente trabalho, considera-se importante estudar o comportamento de vigas alveolares em situação de incêndio.

Sugere-se, ainda, ampliar a abrangência deste estudo verificando o comportamento estrutural de vigas celulares formadas por perfis laminados de abas paralelas disponíveis no Brasil e no exterior.

Este estudo abrangeu apenas o caso de vigas isoladas, sendo, portanto, oportuno ampliá-lo considerando o comportamento de vigas alveolares mistas de aço e concreto.

REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL. *Vigas Celulares ArcelorMittal - Catálogo VCS*. Brasil: [s. d.], 2025. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/software-vca>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14323:2013 – *Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro: [s. d.], 2013.
- BAZILE, A.; TEXIER, J. *Essais de Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 3, no 3, p. 12–25, 1968.
- BITAR, D.; DEMARCO, T.; MARTIN, P. O. *Steel and non-composite cellular beams - Novel approach for design based on experimental studies and numerical investigations*. 2005. Anais [...]. [S. l.]: Eurosteel, 2005.
- BOYER, J. P. *Castellated Beams - New Developments*. Engineering Journal, [s. l.], vol. 1, no 3, p. 104–108, 1964.
- BRINKHUS, R. N. *Análise de Vigas Casteladas e Vigas Casteladas Mistas*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/115556>.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BS 5950-1:2000. Structural use of steelwork in building - Part 1: *Code of practice for design* - Rolled and welded sections. London: [s. d.], 2000.
- DELESQUES, R. *Le Calcul des Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 41–51, 1969.
- DELESQUES, R. *Stabilité des Montants de Poutres Ajourées*. Construction Métallique, [s. l.], vol. 3, no 3, p. 26–33, 1968.

- DURIF, S.; BOUCHAÏR, A.; VASSART, O. *Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 82, p. 72–87, 2013.
- ERDAL, F.; SAKA, M. P. *Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 80, p. 355–368, 2013.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1990:2009. Eurocode - *Basis of structural design*. Brussels: [s. d.], 2009.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1993-1-1: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: *General rules and rules for buildings*. Brussels: [s. d.], 2005.
- FERRARI, G. de A. *Simulação Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Alveolares Mistas de Aço e Concreto*. 2013. Master's thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3789>.
- FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. *Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 172, p. 106182, 2020.
- GALAMBOS, A. R.; HOSAIN, M. U.; SPEIRS, W. G. *Optimum expansion ratio of castellated steel beams*. Engineering Optimization. 1:213-225; 1973.
- GONÇALVES, A. B. *Modelo analítico para dimensionamento de vigas alveolares mistas de aço e concreto*. 2015. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6500>.
- GRILO, L. F. *et al. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 148, p. 525–541, 2018.
- GRILO, L. F. *Formulação para Determinação da Força Cortante Resistente de Flambagem do Montante de Alma em Vigas Celulares de Aço*. 2018. PhD Thesis - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUOS-B32NVX>.
- GRÜNBAUER, B. V. *What are castellated beams?*. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY (JCSS). *JCSS Probabilist Model Code - Part III: Resistance Models*. Zurich: 2002.
- JUSTINO, L. G. *Análise da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento em Vigas Casteladas de Aço em Situação de Incêndio*. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/18687>.
- JUSTINO, L. G. *et al. Shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams in fire*. Engineering Structures, [s. l.], vol. 209, p. 109960, 2020.

- KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. *Failure modes for castellated beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 4, no 4, p. 295–315, 1984.
- LAWSON, R. M. *et al.* *Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 62, no 6, p. 614–629, 2006.
- LAWSON, R. M.; OSHATOGBE, D.; NEWMAN, G. M. *Design of FABSEC Cellular Beams in Non-Composite and Composite Applications: For Both Normal Temperature and Fire Engineering Conditions to SCI AD 269*. Leeds: [s. d.], 2004. Disponível em: Acesso em: 10 set. 2025.
- LAWSON, Robert. M. *et al.* *Design of Composite Beams with Large Web Openings: In Accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*. Ascot: The Steel Construction Institute, 2011.
- LIMBACHIYA, V.; SHAMASS, R. *Application of Artificial Neural Networks for web-post shear resistance of cellular steel beams*. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 161, p. 107414, 2021.
- LUBKE, G. P. *Dimensionamento Otimizado de Vigas Alveolares de Aço*. 2017. Master's Thesis - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_11049_DISSERTA%C7%C3O%20GABRIELA%20LUBKE.pdf.
- MELCHER, J. *et al.* *Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 60, no 3–5, p. 795–808, 2004.
- MENKULASI, F. *et al.* *Investigation of Web Post Compression Buckling Limit State and Stiffener Requirements in Castellated Beams*. Engineering Journal, [s. l.], vol. 54, no 1, p. 21–44, 2017.
- MIRANDA, L. G. J. *et al.* *Comparative analysis of fire-adapted models for the shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams*. Fire Safety Journal, [s. l.], vol. 138, p. 103796, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711223000644> .
- NAJAFI, M.; WANG, Y. C. *Behaviour and design of steel members with web openings under combined bending, shear and compression*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 128, p. 579–600, 2017.
- OLIVEIRA, L. B. de. *Procedimentos para Definição das Características Geométricas de Vigas Alveolares de Aço para Sistemas de Piso e de Cobertura*. 2012. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3777> .
- PANEDPOJAMAN, P.; THEPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. *Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams*. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 76, p. 92–104, 2014.

- PEREIRA, C. L. *Simulação computacional do comportamento estrutural de vigas celulares mistas de aço e concreto com perfil monossimétrico*. 2022. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/29857> .
- REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. *Castellated Beam Web Buckling in Shear*. Journal of Structural Engineering, [s. l.], vol. 124, no 10, p. 1202–1207, 1998.
- REDWOOD, R.; ZAAROUR, W.; MEGHARIEF, J. *Web Post Buckling in Castellated Beams*. In: ADVANCES IN STEEL STRUCTURES (ICASS '96). [S. l.]: Elsevier, 1996. p. 67–71.
- SAE-LONG, W. *et al. Behavior and design implications of web-post shear failure in cellular beams*. Results in Engineering, [s. l.], vol. 27, p. 106709, 2025.
- SAKIYAMA, E. K. H. *Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma por Cisalhamento em Vigas Casteladas Soldadas*. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/20940> .
- SANTOS, E. V. *et al. Web-post buckling behaviour of composite beams with large elliptically-based web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 229, p. 109483, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X25001610> .
- SATERNUS, P. *Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling*. Advances in Science and Technology Research Journal, [s. l.], vol. 16, no 1, p. 213–230, 2022.
- SHAMASS, R.; GUARRACINO, F. *Numerical and analytical analyses of high-strength steel cellular beams: A discerning approach*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 166, p. 105911, 2020.
- TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. *Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 67, no 10, p. 1605–1620, 2011.
- TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. *Optimisation of novel elliptically-based web opening shapes of perforated steel beams*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 76, p. 39–53, 2012.
- VALENTE, M. T. *Análise numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço em situação de incêndio com ênfase nos modos de falha por plastificação*. 2018. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/24521> .
- VERÍSSIMO, G. S. *et al. Estados limites aplicáveis às vigas alveolares de aço*. Revista da Estrutura de Aço. Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), [s. l.], vol. 2, no Volume 2. Número 2, p. 126–144, 2013.

- VIEIRA, H. C. *Análise numérica da flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento em vigas de aço celulares*. 2014. Master's Thesis - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUOS-9MBHXF> .
- VIEIRA, W. B. *Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma*. 2011. Master's Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3744> .
- VIEIRA, W. B. *Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço*. 2015. PhD Thesis - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6741> .
- WANG, P. *et al.* *Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings*. Journal of Constructional Steel Research, [s. l.], vol. 121, p. 173–184, 2016.
- WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. *Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire*. Thin-Walled Structures, [s. l.], vol. 85, p. 441–455, 2014.
- WARD, J. K. *Design of composite and non-composite cellular beams*. Reprinted 1994ed. Ascot: The Steel Construction Institute, 1990.
- ZAAROUR, W.; REDWOOD, R. *Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams*. Journal of Structural Engineering, [s. l.], vol. 122, no 8, p. 860–866, 1996. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281996%29122%3A8%28860%29> .

ANEXO 1 – Série de perfis VCS (Viga Celular Soldada)

Designação	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	R (mm)	A (cm ²)	massa (kg/m)
VCS 300x22,6	300	120	6,3	4,75	0	28,8	22,6
VCS 300x28,2	300	140	8	4,75	0	35,9	28,2
VCS 350x24,5	350	120	6,3	4,75	0	31,1	24,5
VCS 350x28,6	350	120	6,3	6,3	0	36,4	28,6
VCS 350x30	350	140	8	4,75	0	38,3	30,0
VCS 350x34,1	350	140	8	6,3	0	43,4	34,1
VCS 350x32,6	350	160	8	4,75	0	41,5	32,6
VCS 350x36,6	350	160	8	6,3	0	46,6	36,6
VCS 400x31,9	400	140	8	4,75	0	40,6	31,9
VCS 400x36,6	400	140	8	6,3	0	46,6	36,6
VCS 400x41,7	400	140	8	8	0	53,1	41,7
VCS 400x34,4	400	160	8	4,75	0	43,8	34,4
VCS 400x39,1	400	160	8	6,3	0	49,8	39,1
VCS 400x44,2	400	160	8	8	0	56,3	44,2
VCS 400x41,1	400	180	9,5	4,75	0	52,3	41,1
VCS 400x45,7	400	180	9,5	6,3	0	58,2	45,7
VCS 400x50,8	400	180	9,5	8	0	64,7	50,8
VCS 450x36,3	450	160	8	4,75	0	46,2	36,3
VCS 450x41,6	450	160	8	6,3	0	52,9	41,6
VCS 450x47,4	450	160	8	8	0	60,3	47,4
VCS 450x42,9	450	180	9,5	4,75	0	54,7	42,9
VCS 450x48,2	450	180	9,5	6,3	0	61,4	48,2
VCS 450x53,9	450	180	9,5	8	0	68,7	53,9
VCS 450x45,9	450	200	9,5	4,75	0	58,5	45,9
VCS 450x51,1	450	200	9,5	6,3	0	65,2	51,1
VCS 450x56,9	450	200	9,5	8	0	72,5	56,9
VCS 500x50,6	500	180	9,5	6,3	0	64,5	50,6
VCS 500x57,1	500	180	9,5	8	0	72,7	57,1
VCS 500x62,7	500	180	9,5	9,5	0	79,9	62,7
VCS 500x53,6	500	200	9,5	6,3	0	68,3	53,6
VCS 500x60	500	200	9,5	8	0	76,5	60,0
VCS 500x65,7	500	200	9,5	9,5	0	83,7	65,7
VCS 500x72,6	500	250	12,5	6,3	0	92,4	72,6
VCS 500x78,9	500	250	12,5	8	0	100,5	78,9
VCS 500x84,5	500	250	12,5	9,5	0	107,6	84,5
VCS 550x56,1	550	200	9,5	6,3	0	71,5	56,1
VCS 550x63,2	550	200	9,5	8	0	80,5	63,2
VCS 550x69,4	550	200	9,5	9,5	0	88,4	69,4
VCS 550x75	550	250	12,5	6,3	0	95,6	75,0
VCS 550x82	550	250	12,5	8	0	104,5	82,0
VCS 550x88,2	550	250	12,5	9,5	0	112,4	88,2
VCS 600x77,5	600	250	12,5	6,3	0	98,7	77,5
VCS 600x85,2	600	250	12,5	8	0	108,5	85,2
VCS 600x91,9	600	250	12,5	9,5	0	117,1	91,9
VCS 650x88,3	650	250	12,5	8	0	112,5	88,3

Designação	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	R (mm)	A (cm ²)	massa (kg/m)
VCS 650x95,7	650	250	12,5	9,5	0	121,9	95,7
VCS 650x110,4	650	250	12,5	12,5	0	140,6	110,4
VCS 650x114,2	650	300	16	8	0	145,4	114,2
VCS 650x121,4	650	300	16	9,5	0	154,7	121,4
VCS 650x136	650	300	16	12,5	0	173,3	136,0
VCS 700x91,5	700	250	12,5	8	0	116,5	91,5
VCS 700x99,4	700	250	12,5	9,5	0	126,6	99,4
VCS 700x115,3	700	250	12,5	12,5	0	146,9	115,3
VCS 700x117,3	700	300	16	8	0	149,4	117,3
VCS 700x125,2	700	300	16	9,5	0	159,5	125,2
VCS 700x140,9	700	300	16	12,5	0	179,5	140,9
VCS 750x120,5	750	300	16	8	0	153,4	120,5
VCS 750x128,9	750	300	16	9,5	0	164,2	128,9
VCS 750x145,8	750	300	16	12,5	0	185,8	145,8
VCS 750x125,5	750	320	16	8	0	159,8	125,5
VCS 750x133,9	750	320	16	9,5	0	170,6	133,9
VCS 750x150,8	750	320	16	12,5	0	192,2	150,8
VCS 800x123,6	800	300	16	8	0	157,4	123,6
VCS 800x132,6	800	300	16	9,5	0	169,0	132,6
VCS 800x150,7	800	300	16	12,5	0	192,0	150,7
VCS 800x171,8	800	300	16	16	0	218,9	171,8
VCS 800x128,6	800	320	16	8	0	163,8	128,6
VCS 800x137,7	800	320	16	9,5	0	175,4	137,7
VCS 800x155,7	800	320	16	12,5	0	198,4	155,7
VCS 800x176,8	800	320	16	16	0	225,3	176,8
VCS 800x136,2	800	350	16	8	0	173,4	136,2
VCS 800x145,2	800	350	16	9,5	0	185,0	145,2
VCS 800x163,3	800	350	16	12,5	0	208,0	163,3
VCS 800x184,4	800	350	16	16	0	234,9	184,4
VCS 850x136,4	850	300	16	9,5	0	173,7	136,4
VCS 850x155,6	850	300	16	12,5	0	198,3	155,6
VCS 850x178,1	850	300	16	16	0	226,9	178,1
VCS 850x141,4	850	320	16	9,5	0	180,1	141,4
VCS 850x160,7	850	320	16	12,5	0	204,7	160,7
VCS 850x183,1	850	320	16	16	0	233,3	183,1
VCS 850x148,9	850	350	16	9,5	0	189,7	148,9
VCS 850x168,2	850	350	16	12,5	0	214,3	168,2
VCS 850x190,7	850	350	16	16	0	242,9	190,7
VCS 900x145,1	900	320	16	9,5	0	184,9	145,1
VCS 900x165,6	900	320	16	12,5	0	210,9	165,6
VCS 900x189,4	900	320	16	16	0	241,3	189,4
VCS 900x152,7	900	350	16	9,5	0	194,5	152,7
VCS 900x173,1	900	350	16	12,5	0	220,5	173,1
VCS 900x196,9	900	350	16	16	0	250,9	196,9
VCS 900x220,4	900	400	25	9,5	0	280,8	220,4
VCS 900x240,4	900	400	25	12,5	0	306,3	240,4
VCS 900x263,8	900	400	25	16	0	336,0	263,8
VCS 950x148,8	950	320	16	9,5	0	189,6	148,8

Designação	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	R (mm)	A (cm²)	massa (kg/m)
VCS 950x170,5	950	320	16	12,5	0	217,2	170,5
VCS 950x195,7	950	320	16	16	0	249,3	195,7
VCS 950x217,3	950	320	16	19	0	276,8	217,3
VCS 950x156,4	950	350	16	9,5	0	199,2	156,4
VCS 950x178	950	350	16	12,5	0	226,8	178,0
VCS 950x203,2	950	350	16	16	0	258,9	203,2
VCS 950x224,8	950	350	16	19	0	286,4	224,8
VCS 950x224,1	950	400	25	9,5	0	285,5	224,1
VCS 950x245,3	950	400	25	12,5	0	312,5	245,3
VCS 950x270	950	400	25	16	0	344,0	270,0
VCS 950x291,2	950	400	25	19	0	371,0	291,2
VCS 1000x182,9	1000	350	16	12,5	0	233,0	182,9
VCS 1000x209,5	1000	350	16	16	0	266,9	209,5
VCS 1000x232,3	1000	350	16	19	0	295,9	232,3
VCS 1000x250,2	1000	400	25	12,5	0	318,8	250,2
VCS 1000x276,3	1000	400	25	16	0	352,0	276,3
VCS 1000x298,7	1000	400	25	19	0	380,5	298,7
VCS 1000x269,8	1000	450	25	12,5	0	343,8	269,8
VCS 1000x295,9	1000	450	25	16	0	377,0	295,9
VCS 1000x318,3	1000	450	25	19	0	405,5	318,3