

# RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o arquivo completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 26/02/2027.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira**

**GABRIEL SOUZA LOPES**

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM  
VIGAS CELULARES MONOSSIMÉTRICAS DE SEÇÕES HÍBRIDAS**



**Ilha Solteira**  
**2026**

**GABRIEL SOUZA LOPES**

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM  
VIGAS CELULARES MONOSSIMÉTRICAS DE SEÇÕES HÍBRIDAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira – São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia de Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi

**Ilha Solteira**

**2026**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

L864i      Lopes, Gabriel Souza.  
Investigação numérica da flambagem lateral com torção em vigas celulares monossimétricas de seções híbridas / Gabriel Souza Lopes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026  
225 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia de Construção Civil, 2026

Orientador: Emerson Alexandro Bolandim

Coorientador: Alexandre Rossi

Inclui bibliografia

1. Vigas celulares. 2. Monossimetria. 3. Hibridismo.

## **IMPACTO POTENCIAL DA PESQUISA**

A presente pesquisa possui o potencial de expandir a fronteira do conhecimento sobre a estabilidade de sistemas estruturais otimizados, preenchendo uma lacuna na literatura técnica acerca de vigas celulares híbridas monossimétricas. Ao investigar o fenômeno da Flambagem Lateral com Torção (FLT) por meio de um estudo numérico robusto, o trabalho fornece contribuições científicas fundamentais para a compreensão e o aprimoramento de diretrizes propostas pelas normativas vigentes, tanto nacionais quanto internacionais, permitindo o desenvolvimento de projetos mais precisos e seguros.

Além do avanço técnico-científico, a caracterização da influência da monossimetria e do hibridismo viabiliza a concepção de estruturas de alto desempenho, promovendo o uso racional de materiais com diferentes resistências para maximizar a eficiência estrutural e reduzir o peso próprio das edificações. Sob uma abordagem sustentável, a otimização desses perfis reflete-se diretamente na redução da energia incorporada e das emissões de carbono na construção civil. Dessa forma, a inovação tecnológica proposta alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, consolidando o uso do aço como uma solução economicamente viável e ambientalmente responsável.


## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS CELULARES MONOSSIMÉTRICAS DE SEÇÕES HÍBRIDAS**


AUTOR: GABRIEL SOUZA LOPES

ORIENTADOR: EMERSON ALEXANDRO BOLANDIM COORIENTADOR: ALEXANDRE ROSSI


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**EMERSON ALEXANDRO BOLANDIM**  
Data: 27/02/2026 10:02:04-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. EMERSON ALEXANDRO BOLANDIM (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

 Documento assinado digitalmente  
**RODRIGO BARRETO CALDAS**  
Data: 27/02/2026 14:28:40-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO BARRETO CALDAS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia de Estruturas / Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

 Documento assinado digitalmente  
**SAULO JOSE DE CASTRO ALMEIDA**  
Data: 27/02/2026 15:36:48-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. SAULO JOSÉ DE CASTRO ALMEIDA (Participação Virtual)  
Departamento de Estruturas / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ilha Solteira, 26 de fevereiro de 2026.

À minha família, com amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, pela força concedida e pelas inúmeras bênçãos que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Ednilson e Ivone, cujo apoio incondicional ao longo da minha caminhada foi a base de cada objetivo alcançado; sem vocês, nada seria possível. À minha companheira de vida, Camila, sou grato pelo apoio e cuidado constantes, e por caminhar ao meu lado em cada desafio.

Ao meu orientador e amigo, Professor Emerson Alexandro Bolandim, expresso profunda gratidão pela partilha de ensinamentos e pelas oportunidades. Sua trajetória é para mim uma fonte de inspiração, e guardarei com alegria a experiência de ser seu orientado, agradecendo o empenho incansável em minha evolução como pesquisador e, sobretudo, como ser humano.

Ao coorientador e amigo, Professor Alexandre Rossi, agradeço o tempo dedicado e pelas valiosas lições que contribuíram para a minha formação. É um privilégio ter compartilhado esta etapa acadêmica sob sua orientação e parceria.

Aos colegas da UNESP pela presença, em especial àqueles que conviveram mais de perto comigo nesta etapa. De modo particular, agradeço aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Mecânica Computacional Aplicada pela troca de conhecimentos, pelo incentivo e pelos momentos de descontração que tornaram o percurso mais leve.

Aos demais professores que cruzaram meu caminho acadêmico, meu sincero agradecimento.

À CAPES, pelo fomento à pesquisa por meio da concessão da bolsa de mestrado.

## RESUMO

O uso de estruturas metálicas tem se expandido devido aos seus benefícios estruturais e econômicos, impulsionando a inovação em perfis otimizados como as vigas celulares híbridas monossimétricas, cuja literatura ainda é escassa e carece de normas de dimensionamento específicas para fenômenos como a Flambagem Lateral com Torção (FLT). Diante dessa lacuna, este estudo realizou uma investigação numérica com 1080 modelos no software Abaqus, evidenciando que a monossimetria é o fator preponderante na estabilidade, onde perfis com mesa de maior inércia maximizam o momento crítico e resistente devido ao aumento da inércia e ao Efeito Wagner. Os resultados demonstraram que o hibridismo é altamente eficaz em vigas de baixa esbeltez global governadas pela plastificação, enquanto em grandes vãos a resposta é limitada pela estabilidade elástica. Quanto à avaliação normativa, a NBR 8800:2024 apresentou um desempenho equilibrado e moderadamente conservador, contrastando com a elevada dispersão da AISC 360:2022 e a consistência, embora levemente não conservadora, das normas EN 1993-1-1:2022 e AS 4100:2020. Assim, essa tipologia consolida-se como uma solução de alto desempenho e sustentável, permitindo a otimização precisa entre geometria e resistência material para maximizar a capacidade de carga e a racionalização do aço.

**Palavras-chave:** vigas celulares; monossimetria; hibridismo.

## ABSTRACT

The use of steel structures has expanded due to their structural and economic benefits, driving innovation in optimized profiles such as monosymmetric hybrid cellular beams, for which literature remains scarce and specific design standards for phenomena like Lateral-Torsional Buckling (LTB) are lacking. Addressing this gap, this study conducted a numerical investigation comprising 1080 models in Abaqus software, evidencing that monosymmetry is the prevailing factor in stability, where profiles with larger compression flanges maximize the critical and resistant moments due to increased inertia and the Wagner Effect. The results demonstrated that hybridism is highly effective in low-slenderness beams governed by plastic collapse, whereas in large spans, the response is limited by elastic stability. Regarding the normative assessment, NBR 8800:2024 showed a balanced and moderately conservative performance, contrasting with the high dispersion of AISC 360:2022 and the consistent, yet slightly non-conservative, nature of EN 1993-1-1:2022 and AS 4100:2020. Thus, this typology establishes itself as a high-performance and sustainable solution, allowing for precise optimization between geometry and material strength to maximize load capacity and steel rationalization.

**Keywords:** cellular beams; monosymmetry; hybridism

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) Procedimento de corte e solda do perfil para a obtenção do alvéolo circular; b) Compatibilização entre as vigas celulares e sistemas de dutos	19
Figura 2 - Método de produção de vigas celulares híbridas. (a) Duas vigas idênticas com diferentes tipos de aço. (b) Processo de corte de vigas celulares. (c) Viga híbrida celular	20
Figura 3 - Modos de falha de vigas alveolares celulares	21
Figura 4 - Procedimento metodológico	25
Figura 5 - Trajetória do corte e solda do perfil para a obtenção do alvéolo circular	26
Figura 6 - Compatibilização do projeto estrutural de vigas celulares com o projeto elétrico de iluminação	27
Figura 7 - Processo de corte por oxicorte e a laser	28
Figura 8 - Viga celular monossimétrica	28
Figura 9 - Torre de um castelo com ameias	30
Figura 10 – Estabilidade de estruturas. (a) Equilíbrio estável; (b) Equilíbrio instável	35
Figura 11– Possíveis comportamentos de uma viga quando submetida à esforços	36
Figura 12- Instabilidade bifurcacional	37
Figura 13- Instabilidade por snap-through	38
Figura 14 - Rótulas plásticas formadas pela ocorrência do Mecanismo Vierendeel em vigas celulares	40
Figura 15 - Linhas de tensão e compressão geradas pela combinação de esforços no perfil	41
Figura 16 - Ruptura do montante de alma pelo esforço cisalhante	42
Figura 17 - Flambagem Lateral com Torção	43
Figura 18 - Processo de resfriamento de perfis laminados a quente	47
Figura 19 - Esquema do aumento de temperatura no processo de solda	47
Figura 20 – Diagrama tensão x deformação com e sem tensões residuais	48
Figura 21 - Tensões residuais em “seções T”	49
Figura 22 – Modelo de tensões residuais de Sonck	50
Figura 23 - Imperfeições geométricas	51
Figura 24 - Posicionamento dos momentos para o cálculo do $C_b$	61
Figura 25 - Algoritmo de Riks modificado	75
Figura 26 - Elemento finito de quatro nós com integração total	75
Figura 27 - Vínculo de Garfo	76
Figura 28 - Perfil de uma viga alveolar bissimétrica (na região do alvéolo)	78

Figura 29 - Aparato experimental de Boissonade <i>et al.</i> , (2024)	79
Figura 30 – Relação tensão-deformação do aço proposta por Earls (1999)	80
Figura 31 - Perfil de uma viga alveolar bissimétrica híbrida	81
Figura 32 - Aparato experimental de Sehwill e Celikag (2022)	82
Figura 33 - Modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico	83
Figura 34 – a) Perfil de uma viga monossimétrica homogênea b) Perfil de uma viga monossimétrica híbrida	84
Figura 35 - Aparato experimental de Tankova, <i>et al</i> (2021)	85
Figura 36 - Modelo constitutivo elastoplástico com encruamento	86
Figura 37 – Avaliação da discretização do modelo numérico	88
Figura 38 - Calibração do modelo numérico com base nos dados de Boissonade <i>et al.</i> , (2024)	89
Figura 39 - Avaliação da variação das imperfeições iniciais no modelo de vigas alveolares bissimétricas homogêneas	90
Figura 40 – Curva tensão-deformação de Yun e Gardner (2017)	91
Figura 41- Comportamento do modelo numérico de vigas alveolares bissimétricas homogêneas com o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017)	91
Figura 42 - Calibração do modelo numérico com base nos dados de Sehwill e Celikag (2023)	92
Figura 43 - Avaliação da variação das imperfeições iniciais no modelo de vigas alveolares bissimétricas híbridas	93
Figura 44 - Comportamento do modelo numérico de vigas alveolares bissimétricas híbridas com o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017)	94
Figura 45 - Calibração do modelo numérico com base nos dados do modelo B11 de Tankova <i>et al.</i> , (2021)	95
Figura 46 - Calibração do modelo numérico com base nos dados do modelo B12 de Tankova <i>et al.</i> , (2021)	95
Figura 47 - Calibração do modelo numérico com base nos dados do modelo B13 de Tankova <i>et al.</i> , (2021)	96
Figura 48 - Calibração do modelo numérico com base nos dados do modelo B14 de Tankova <i>et al.</i> , (2021)	96
Figura 49 - Avaliação da variação das imperfeições iniciais no modelo de vigas de alma cheia monossimétricas homogêneas (B11)	98

Figura 50 - Avaliação da variação das imperfeições iniciais no modelo de vigas de alma cheia monossimétricas híbridas (B12)	99
Figura 51 - Avaliação da variação das imperfeições iniciais no modelo de vigas de alma cheia monossimétricas homogêneas (B13)	100
Figura 52 - Avaliação da variação das imperfeições iniciais no modelo de vigas de alma cheia monossimétricas híbridas (B14)	101
Figura 53 - Comportamento do modelo numérico de vigas de alma cheia homogêneas (B11) com o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017)	102
Figura 54 - Comportamento do modelo numérico de vigas de alma cheia híbridas (B12) com o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017)	102
Figura 55 - Comportamento do modelo numérico de vigas de alma cheia homogêneas (B13) com o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017)	103
Figura 56 - Comportamento do modelo numérico de vigas de alma cheia híbridas (B14) com o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017)	104
Figura 57 - Estudo paramétrico	106
Figura 58 - Influência do grau de monossimetria e das condições de carregamento no momento crítico $M_{cr}$ em função do comprimento destravado	107
Figura 59 - Influência do grau de monossimetria e das condições de carregamento no momento resistente $M_n$ em função do comprimento destravado (qual aço foi utilizado???)	108
Figura 60 - Comparação do momento resistente normalizado pela seção de referência	109
Figura 61 - Variação do momento resistente normalizado pela seção de referência para diferentes aberturas de alvéolo na situação de momento uniforme	111
Figura 62 - Variação do momento resistente normalizado pela seção de referência para diferentes aberturas de alvéolo na situação de carga concentrada	112
Figura 63 - Variação do momento resistente normalizado pela seção de referência para diferentes aberturas de alvéolo na situação de carga distribuída	113
Figura 64 – Comparação entre os momentos críticos numéricos e os valores teóricos obtidos sob a condição de momento uniforme.	115
Figura 65 – Comparação entre os momentos críticos numéricos e os valores teóricos obtidos sob a condição de carga concentrada no meio do vão.	118
Figura 66 – Comparação entre os momentos críticos numéricos e os valores teóricos obtidos sob a condição de carga uniformemente distribuída na mesa superior	121
Figura 67 - Comparação entre os momentos resistentes numéricos e os valores teóricos obtidos sob a condição de momento uniforme	124

Figura 68 - Comparação entre os momentos resistentes numéricos e os valores teóricos obtidos sob a condição de carga concentrada no meio do vão	127
Figura 69 - Comparação entre os momentos resistentes numéricos e os valores teóricos obtidos sob a condição de carga uniformemente distribuída na mesa superior	130
Figura 70 - Avaliação do momento crítico elástico ( $M_{cr}$ ): análise estatística das normas para diferentes casos de carregamento	133
Figura 71- Avaliação do momento resistente ( $M_n$ ): análise estatística das normas para diferentes casos de carregamento	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores recomendados para as curvas e fatores de imperfeição para a FLT	66
Tabela 2 – Fator de imperfeição para flambagem lateral com torção de seções I bissimétricas e seções H	66
Tabela 3 - Valores dos fatores C1, C2 e C3 correspondentes aos valores dos fatores k	68
Tabela 4 - Características geométricas definidas em Boissonade <i>et al.</i> , (2024)	78
Tabela 5 – Especificações do material de acordo Boissonade <i>et al.</i> , (2024)	79
Tabela 6 - Características geométricas definidas em Sehwal e Celikag (2022)	81
Tabela 7 - Especificações do material de acordo com Sehwal e Celikag (2022)	82
Tabela 8 -Características geométricas definidas em Tankova et al., (2021)	84
Tabela 9 - Especificações dos materiais utilizados em cada modelo ensaiado de Tankova, <i>et al</i> (2021)	85
Tabela 10 – Discretização do modelo numérico	87
Tabela 11 – Resumo dos modelos numéricos calibrados.	105
Tabela 12 – Avaliação estatística global das previsões normativas do momento crítico à flambagem lateral com torção.	136
Tabela 13 – Avaliação estatística global das previsões normativas do momento resistente	137

## LISTA DE SIMBOLOS

- $a_0$  diâmetro do alvéolo
- $b_{fi}$  largura da mesa inferior
- $b_{fs}$  largura da mesa superior
- $C_1$  coeficiente associado ao diagrama de momento fletores
- $C_2$  coeficiente associado ao ponto de aplicação do carregamento
- $C_3$  coeficiente associado à monossimetria da seção
- $C_b$  fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
- $C_w$  constante de empenamento
- $e_y$  ponto de aplicação do carregamento externo em relação ao centro de torção
- $E$  módulo de elasticidade
- $F_{cr}$  tensão crítica para FLT
- $f_M$  fator que considera a distribuição do momento fletor entre apoios laterais
- $f_y$  tensão de escoamento
- $F_L$  tensão nominal da mesa comprimida
- $G$  módulo de elasticidade transversal
- $h_0$  distância entre os centroides das mesas
- $I_y$  momento de inércia em torno do eixo y
- $I_{yTc}$  momento de inércia do tê comprimido
- $I_w$  momento de inércia ao empenamento ou momento de inércia setorial
- $J$  constante de torção
- $k$  coeficiente associado ao tipo de vinculação
- $L_b$  comprimento destravado da viga
- $m(z)$  função que dá a forma do diagrama de momento
- $M_{cr}$  momento crítico elástico
- $M_{max}$  momento fletor máximo ao longo do vão
- $M_r$  momento fletor correspondente ao início de escoamento
- $M_{Rd}$  momento resistente de cálculo
- $M_{pl}$  momento de plastificação
- $M_x, M_y$  momentos fletores em relação aos eixos x e y, respectivamente
- $r_{ts}$  o raio de giração da mesa comprimida
- $r_y$  raio de giração – eixo y
- $r_{yTc}$  raio de giração da seção T
- $r_0$  raio polar de inércia

$s$  passo entre alvéolos

$t_{fi}$  espessura da mesa inferior

$t_{fs}$  espessura da mesa superior

$t_w$  espessura da alma

$U$  energia potencial total

$W$  módulo resistente elástico da seção

$W_c$  módulo resistente elástico do lado comprimido da seção

$W_t$  módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção

$y_G, y_c$  coordenadas na direção  $y$  do centro de gravidade e do centro de torção

$z_g$  refere-se à distância vertical entre o ponto de aplicação da carga e o centro de torção da seção

$Z_x$  módulo plástico da seção sob o eixo  $x$

### **Símbolos Gregos**

$\alpha_{LT}$  fator de imperfeição, definido conforme a curva de flambagem

$\beta_x$  parâmetro de monossimetria da seção

$\chi_{LT}$  fator de redução para a flambagem lateral com torção

$\varphi_z$  rotação específica

$\bar{\lambda}_z$  esbeltez relativa para flambagem por flexão no eixo de menor inércia

$\lambda$  índice de esbeltez

$\lambda_p$  parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação

$\lambda_r$  parâmetro de esbeltez correspondente ao início de escoamento

$\sigma_r$  tensão residual de compressão nas mesas

$\sigma_{res,alma}$  tensão residual para a alma de viga alveolar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Perfis Alveolares .....</b>	<b>26</b>
2.1.1	Breve histórico das vigas alveolares .....	29
<b>2.2</b>	<b>Vigas Monossimétricas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>Vigas Híbridas .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4</b>	<b>FLT em Aços de Alta Resistência .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5</b>	<b>Fenômenos de instabilidade em estruturas metálicas .....</b>	<b>34</b>
2.5.1	Fenômenos de Estabilidade Em Estruturas Metálicas.....	35
<b>2.6</b>	<b>Modos De Colapso Em Vigas Celulares .....</b>	<b>39</b>
2.6.1	Modos de Falha Locais.....	39
2.6.2	Modos de falha globais.....	42
<b>2.7</b>	<b>Imperfeições Geométricas E Tensões Residuais Em Perfis Alveolares.....</b>	<b>46</b>
2.7.1	Tensão residual.....	46
2.7.2	Imperfeições geométricas.....	50
<b>2.8</b>	<b>Procedimentos de Cálculo.....</b>	<b>52</b>
<b>2.9</b>	<b>Momento crítico básico .....</b>	<b>53</b>
<b>2.10</b>	<b>NBR 8800:2024 .....</b>	<b>57</b>
<b>2.11</b>	<b>AISC 360:2022 .....</b>	<b>62</b>
<b>2.12</b>	<b>EN 1993-1-1:2022 .....</b>	<b>65</b>
<b>2.13</b>	<b>AS 4100:2020.....</b>	<b>69</b>
<b>3</b>	<b>MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>72</b>
<b>3.1</b>	<b>Análise Numérica .....</b>	<b>72</b>

<b>3.2</b>	<b>Análise de Estabilidade Elástica .....</b>	<b>73</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise Não Linear Física e Geométrica .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4</b>	<b>Elemento Finito.....</b>	<b>75</b>
<b>3.5</b>	<b>Condições de Contorno .....</b>	<b>76</b>
<b>3.6</b>	<b>Estratégias Para Abordagem Numérica.....</b>	<b>77</b>
3.6.1	Abordagem para a Situação de Vigas Celulares Bissimétricas Homogêneas .....	77
3.6.2	Abordagem para situação de vigas celulares bissimétricas híbridas .....	80
3.6.3	Abordagem para situação de vigas monossimétricas homogêneas .....	83
<b>4</b>	<b>CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>87</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo Numérico de Vigas Celulares Bissimétricas Homogêneas .....</b>	<b>87</b>
4.1.1	Estudo da Discretização do Modelo .....	87
4.1.2	Calibração do Modelo Numérico .....	88
4.1.3	Avaliação do Modelo Numérico Para Diferentes Situações .....	89
<b>4.2</b>	<b>Modelo Numérico de Vigas Celulares Bissimétricas Híbridas.....</b>	<b>91</b>
4.2.1	Calibração do modelo numérico.....	92
4.2.2	Avaliação do modelo para diferentes situações .....	92
<b>4.3</b>	<b>Modelo Numérico de Vigas de Alma Cheia Monossimétricas .....</b>	<b>94</b>
4.3.1	Calibração dos modelos numéricos .....	94
4.3.2	Avaliação do modelo para diferentes situações .....	97
<b>4.4</b>	<b>Resumo dos resultados obtidos pela calibração do modelo numérico.....</b>	<b>104</b>
<b>5</b>	<b>PLANEJAMENTO DO ESTUDO PARAMÉTRICO .....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>107</b>
<b>6.1</b>	<b>Influência dos parâmetros geométricos e físicos .....</b>	<b>107</b>
6.1.1	Influência do hibridismo e do diâmetro do alvéolo.....	109
<b>6.2</b>	<b>Resultados numéricos e previsões normativas.....</b>	<b>113</b>
6.2.1	Análise do momento crítico elástico ( $M_{cr}$ ) .....	114
6.2.2	Análise do momento resistente ( $M_n$ ).....	123

<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>138</b>
	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>140</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>141</b>

## 1 INTRODUÇÃO

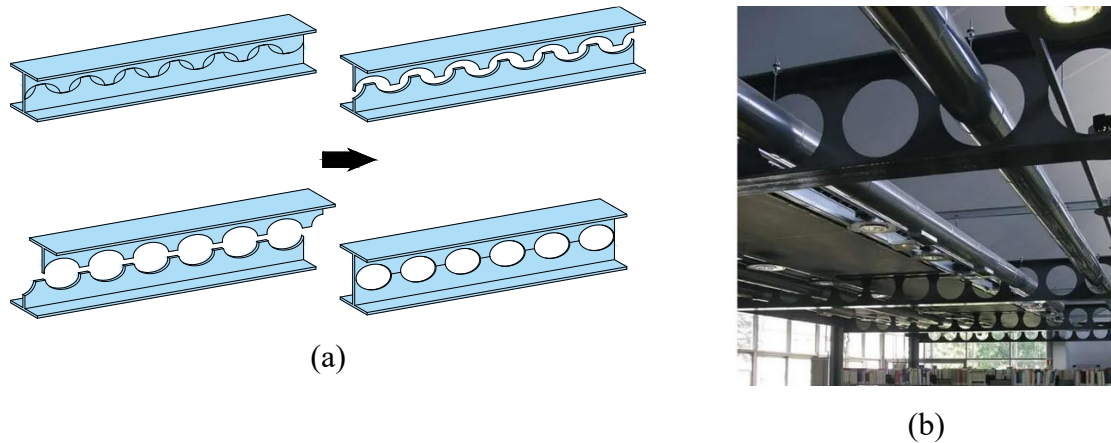
O aumento da demanda por projetos de construção está aquecendo o mercado da Engenharia Civil, especialmente no uso de estruturas de aço. O uso de tais estruturas é fundamentado em sua alta resistência, durabilidade e versatilidade. Essas estruturas são frequentemente empregadas em edifícios, pontes, torres e outras obras, devido à sua alta capacidade de carga e de permitir maiores vãos livres em comparação com outras soluções construtivas.

A utilização de estruturas metálicas também proporciona rapidez na execução da obra, reduzindo os prazos de construção e os custos associados à mão de obra. Além disso, essas estruturas são mais leves em comparação com as estruturas de concreto armado, o que pode resultar em fundações mais econômicas e em menor impacto ambiental durante a construção.

Ao idealizar vigas de aço otimizadas, surgiram as vigas alveolares no cenário europeu durante o século XX. Essa inovação foi motivada pela demanda por perfis de maior altura do que os disponíveis na forma de perfis I laminados produzidos pela indústria da época. O processo pioneiro de fabricação das vigas alveolares foi proposto por Litzka em 1962, envolvia o corte longitudinal dos perfis I, seguindo um padrão específico, que permitia separar as duas metades resultantes. Estas partes eram então deslocadas por uma determinada extensão e soldadas, formando uma viga com altura superior à do perfil original (Figura 1.a). Essas vigas apresentavam uma sequência de aberturas ao longo da alma, conferindo-lhes características estruturais e de desempenho específicas (Sonck, 2013).

Além dos benefícios relacionados ao aumento da capacidade estrutural resultante do aumento da seção transversal do perfil, os perfis alveolares apresentam diversas vantagens adicionais relacionadas ao desempenho arquitetônico (Oliveira, 2012). As aberturas na alma melhoram a estética dos ambientes internos, facilitam a entrada de luz natural, a circulação do ar e a evacuação de fumaça, além de possibilitarem a passagem de dutos de serviços técnicos pela estrutura. Essa integração possibilita a redução da altura do pé-direito (Figura 1.b), o que é economicamente vantajoso. Além disso, a sua aparência leve, combinada com a sua elevada resistência, inspira os arquitetos a conceberem novas formas estruturais. Esses perfis são altamente versáteis, seus benefícios podem ser aproveitados para o reforço de edifícios antigos e há a possibilidade da fabricação com contraflecha (Pereira, 2022).

Figura 1 - a) Procedimento de corte e solda do perfil para a obtenção do alvéolo circular; b) Compatibilização entre as vigas celulares e sistemas de dutos



Fonte: (a) Autor (2026); (b) AcelorMittal (2025).

Além da descrição do processo de fabricação desenvolvido por Litzka, na literatura são escassas as descrições sobre os processos de fabricação de vigas alveolares. Destaca-se que não existe um único processo de fabricação adotado por todos os fabricantes de vigas alveolares. Pelo contrário, é mais provável que cada fabricante faça ajustes em seus métodos de produção, os quais podem variar de acordo com o estágio de desenvolvimento tecnológico da empresa, a localização geográfica, os recursos disponíveis e a demanda pelas vigas alveolares.

Embora essas vigas economizem aço, sua fabricação implica em custos de produção mais altos, tornando a economia mais significativa em produções em larga escala com designs padronizados. Por um período, por conta do alto custo da mão de obra para fabricar vigas alveolares, essa opção se tornou menos competitiva, deixando de ser considerada (Veríssimo, 2010). No entanto, os avanços tecnológicos na automação e controle numérico computadorizado reduziram os custos de corte e solda, tornando as vigas alveolares competitivas novamente. Essa evolução tecnológica renovou o interesse pelas vigas alveolares na construção de estruturas metálicas, devido às suas vantagens estruturais e arquitetônicas.

Originalmente denominadas vigas casteladas devido à semelhança da seção cortada com a crista de um castelo medieval, essas também foram conhecidas em alguns lugares como vigas colmeia, devido aos furos que lembram os alvéolos de uma colmeia. Além disso, fazem parte do grupo das vigas alveolares as vigas Angelinas®, cujo tipo de abertura é senoidal, com o padrão de abertura elíptica e as vigas celulares, assim chamadas devido às aberturas circulares em sua alma (Aguiar, 2023). O surgimento das vigas celulares ocorreu posteriormente ao das

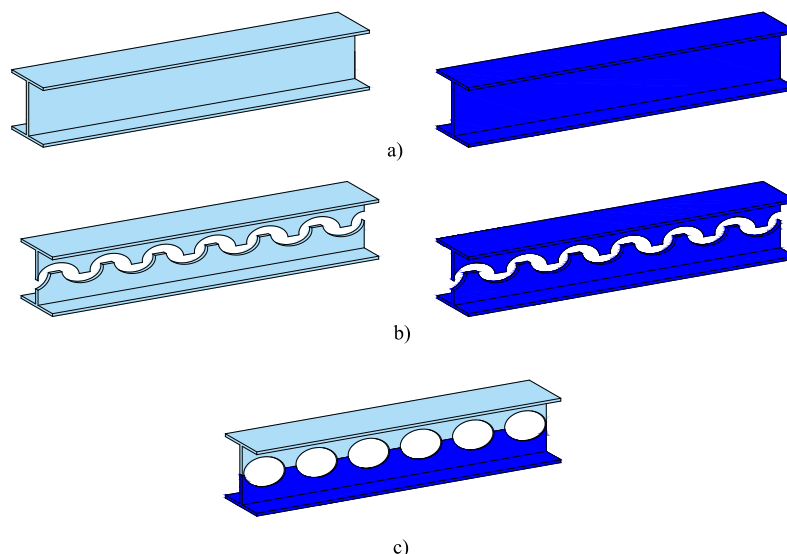
vigas casteladas, em decorrência do avanço dos equipamentos de corte e soldagem de perfis de aço.

As chamadas "vigas de alma expandida", apresentam altura maior, devido ao processo de expansão da alma, resultando em maior momento de inércia e, conseqüentemente, maior resistência à flexão e rigidez aos deslocamentos na direção do plano médio da alma. No entanto, as aberturas na alma podem reduzir a capacidade resistente da viga sob determinadas condições de carregamento e modificar as condições de contorno da alma, levando a fenômenos de instabilidade localizada devido à esbeltez dos elementos que compõem a seção. Apesar dessas considerações, em muitos casos essa solução é vantajosa e é amplamente utilizada em obras e projetos de larga escala (Morkhade *et al.*, 2019).

Os aços utilizados na produção de perfis metálicos atualmente apresentam uma resistência superior à dos aços produzidos em décadas passadas. Além disso, as novas tecnologias de corte computadorizado têm possibilitado a fabricação de vigas alveolares com novas geometrias, ampliando as possibilidades de projeto.

Uma variação interessante das vigas alveolares é a presença de dois tipos de materiais com diferentes características mecânicas em um mesmo perfil (Figura 2). Geralmente são empregados perfis monossimétricos, de modo a otimizar a seção transversal, evitando a subutilização da resistência dos materiais utilizados. Esse tipo de elemento estrutural, denominado viga monossimétrica alveolar de aço de seção híbrida, é pouco investigado.

Figura 2 - Método de produção de vigas celulares híbridas. (a) Duas vigas idênticas com diferentes tipos de aço. (b) Processo de corte de vigas celulares. (c) Viga híbrida celular



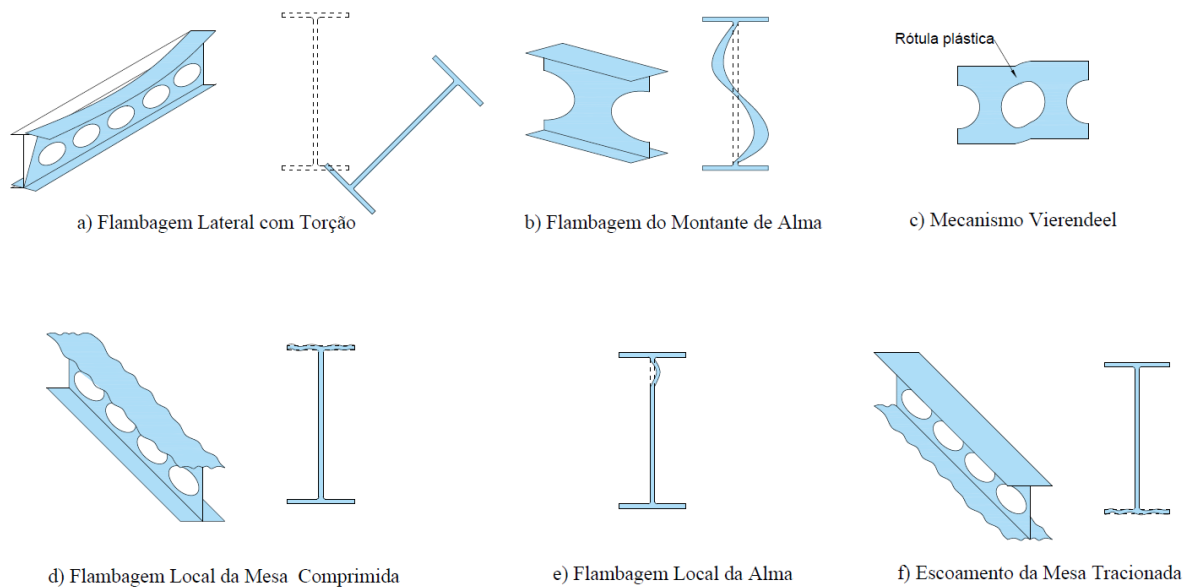
Fonte: Adaptado de Schwail e Celikag (2022).

Vigas híbridas são vigas compostas por mesas e almas soldadas com aços de diferentes resistências mecânicas. Essa tipologia de vigas têm a capacidade resistente maximizada ao usar aços com características distintas. A combinação de diferentes tipos de aço, juntamente com as aberturas na alma, características das vigas alveolares, resulta em perfis leves e de alta resistência (Salah, 2022).

Devido à sua elevada esbelteza, os elementos estruturais de aço apresentam maior vulnerabilidade as instabilidades. Quando submetidos a tensões normais de compressão, podem manifestar modos específicos de instabilidade local, global e local-global. Além disso, esses elementos também estão sujeitos a instabilidades causadas pela força cortante.

No caso das vigas celulares, esse risco é agravado pela geometria da alma, influenciada pela expansão do perfil e pela presença de aberturas, o que torna os elementos ainda mais esbeltos. A partir de análises realizadas em documentos normativos, teses, dissertações e relatórios de ensaios experimentais (Nethercot e Kerdal, 1982; Kerdal e Nethercot, 1984; Okubo e Nethercot, 1985), identificam-se como modos de falha mais recorrentes a Flambagem Lateral com Torção (FLT), a Flambagem do Montante de Alma (FMA) e o Mecanismo Vierendeel (MV). A Figura 3 ilustra os modos de falha mais recorrentes em vigas alveolares celulares.

Figura 3 - Modos de falha de vigas alveolares celulares



Fonte: Autor (2026).

Adicionalmente, podem ocorrer outros modos de falha, como a Flambagem Local da Mesa comprimida (FLM), a Flambagem Local da Alma (FLA) e o Escoamento da Mesa Tracionada (EMT).

O dimensionamento desses elementos é mais complexo em comparação com os perfis de alma cheia. A norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2024) não apresenta recomendações específicas para o dimensionamento de vigas alveolares, mas adaptações podem ser feitas no cálculo das propriedades geométricas desses elementos com aberturas.

Esses avanços tecnológicos e a utilização de novos materiais justificam a realização de novos estudos teóricos, numéricos e experimentais, visando um melhor entendimento do comportamento estrutural das vigas alveolares e a sua otimização em termos de desempenho e eficiência.

## 1.1 Justificativa

A utilização de perfis I híbridos monossimétricos, que combinam dois tipos de aço em uma única seção, surge como uma solução inovadora e eficiente na construção civil. Na prática, essa abordagem busca oferecer benefícios estruturais e arquitetônicos, com a prerrogativa de reduzir a emissão de carbono na indústria (pelo uso racional dos materiais de maior resistência). Tal estratégia diminui o impacto ambiental e promove a sustentabilidade.

Apesar do potencial dessas vigas celulares híbridas monossimétricas, seu comportamento estrutural ainda é pouco investigado, e a literatura carece de recomendações específicas para o seu dimensionamento. A maioria dos modelos analíticos existentes para a previsão da capacidade resistente, em especial para a instabilidade global, foi originalmente desenvolvida para vigas de alma cheia e homogêneas (Timoshenko e Gere, 1961; ABNT, 2024; AS, 2020; Salmon *et al.*, 2009). Estudos experimentais e numéricos comprovam o aumento da capacidade resistente à flexão de vigas alveolares híbridas quando comparadas às vigas de seção homogênea, conforme demonstrado em Schwail *et al.*, (2022) e Schwail *et al.*, (2023). Desse modo, evidencia-se a necessidade de ajustes e aprimoramentos nas formulações existentes para fornecer previsões confiáveis e melhor explorar o potencial desses elementos.

Na prática há um número limitado de resultados experimentais referentes a vigas alveolares híbridas (Schwail *et al.*, 2022; Schwail *et al.*, 2023). Nesse contexto, a análise numérica se torna uma ferramenta interessante para a investigação do comportamento estrutural em relação aos mecanismos de falha do perfil. Entre as principais vantagens, destaca-se o menor custo associado ao desenvolvimento deste tipo de investigação e a possibilidade de

desenvolvimento de estudos em larga escala, tanto de caráter exploratório, quanto em relação a variação de parâmetros que influenciam no comportamento do modelo.

A literatura é escassa quando se trata de perfis I híbridos alveolares monossimétricos, para a previsão analítica do comportamento. Em relação ao esforço de flexão, as normas europeia e australiana contemplam a influência da monossimetria (por meio dos parâmetros  $C_3$  e  $\beta_x$ , respectivamente) associada a situações variadas de aplicação de esforços. Por outro lado, observa-se que os estudos numéricos existentes não correlacionam a variação do comprimento destravado ( $L_b$ ) com o número de alvéolos. O aumento do vão implica, necessariamente, no aumento do número de alvéolos, o que (i) dificulta a previsão do comportamento do perfil em relação à FLT e (ii) levanta questionamentos quanto à aplicabilidade dos modelos teóricos e numéricos.

Assim, torna-se necessário detalhar e aprimorar a metodologia de investigação desses perfis, visando preencher as lacunas técnicas identificadas. O estudo aprofundado desses perfis, contribui, portanto, para o avanço do estado da arte e reforça a viabilidade ambiental, considerando a significativa redução na emissão de carbono. Essa abordagem alinha-se diretamente com os princípios dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável e responsável.

## 1.2 Objetivos

Avaliar o desempenho de vigas celulares monossimétricas de seção híbrida, submetidas a esforços de flexão, investigando o comportamento quanto à flambagem lateral com torção (FLT).

Para isso, os seguintes objetivos específicos precisam ser alcançados:

- a) estudar os modelos analíticos de cálculo existentes para a previsão da FLT de vigas alveolares;
- b) verificar a influência do efeito da monossimetria;
- c) quantificar a influência do hibridismo;
- d) avaliar a precisão das normativas vigentes.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a estabilidade de vigas celulares monossimétricas híbridas, uma solução estrutural que integra desempenho mecânico, estética e durabilidade. Por meio de um amplo estudo paramétrico no *software* Abaqus, buscou-se compreender a influência de diversos parâmetros tanto na carga crítica quanto na carga resistente última.

A análise em regime linear elástico mostrou-se fundamental para caracterizar a Flambagem Lateral com Torção (FLT) em função da monossimetria das seções. Visto que fenômenos de instabilidade global podem ocorrer antes de qualquer plastificação, especialmente em grandes vãos. A pesquisa dedicou-se à compreensão do comportamento desses elementos estruturais sob condições usuais de flexão simples, submetidas a cargas distribuídas e concentradas. Além disso explorou-se o impacto do hibridismo, onde a utilização de dois aços distintos influencia diretamente as propriedades físicas da seção, em especial a plastificação da seção transversal.

A geometria da seção, especificamente o grau de monossimetria, demonstrou ser o fator preponderante na estabilidade elástica e na capacidade resistente do elemento estrutural. Perfis com maior área na mesa comprimida apresentam ganhos significativos no momento crítico e no momento resistente, devido ao aumento da inércia na região crítica para a Flambagem Lateral com Torção (FLT) e à elevação do centro de cisalhamento (Efeito Wagner). Por outro lado, a variação do diâmetro das aberturas exerceu influência secundária, afetando a resistência apenas em vigas de baixa esbeltez devido ao favorecimento de modos de falha locais.

A eficiência do hibridismo está intrinsecamente ligada à esbeltez da viga. Em perfis de baixa esbeltez, governados pela plastificação, a utilização de aços de maior resistência na seção comprimida resulta no aumento substancial na capacidade resistente do perfil. Contudo, à medida que a esbeltez aumenta e o modo de falha transita para a instabilidade elástica, o ganho de resistência torna-se menor, uma vez que a resposta elástica depende essencialmente do módulo de elasticidade, que é constante independentemente da classe do aço.

As normas avaliadas apresentaram comportamentos distintos quanto à precisão e segurança, destacando-se a NBR 8800:2024 por um desempenho equilibrado e moderadamente não conservador, embora tenha demonstrado maior sensibilidade às variações da seção no regime de resistência última. Em contraste, o AISC 360:2022 exibiu elevada dispersão e um acentuado não conservadorismo no cálculo do momento crítico, principalmente por não considerar plenamente os efeitos da monossimetria na análise elástica; contudo, no regime último, essa tendência foi invertida para um viés predominantemente conservador. Por fim, as

normas EN 1993-1-1:2022 e AS 4100:2020 mostraram-se as mais consistentes, com menor dispersão estatística, embora ambas tenham tendido a previsões levemente conservadoras ao estimar capacidades resistentes superiores às obtidas nas análises numéricas para os perfis estudados

A utilização de vigas alveolares monossimétricas e híbridas constitui uma solução estrutural de alto desempenho, pois permite a otimização precisa entre a geometria da seção e a resistência dos materiais empregados. Ao concentrar mesas de maior inércia e capacidade resistente na região comprimida, maximiza-se o aproveitamento plástico e eleva-se significativamente o momento crítico à Flambagem Lateral com Torção (FLT), mitigando instabilidades globais de forma superior aos perfis convencionais.

A utilização de vigas celulares híbridas monossimétricas não apenas amplia a capacidade de carga do elemento estrutural, mas também assegura uma utilização consciente do material. Dessa forma, essa tipologia consolida-se como uma alternativa de excelência para projetos que exigem alta performance e a racionalização do uso do aço.

## SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento deste trabalho, verificou-se a possibilidade da realização de trabalhos futuros na abordagem dos seguintes itens:

- Realização de análises experimentais que contemplem a lacuna de dados sobre vigas celulares monossimétricas híbridas, visando a validação dos modelos numéricos e a observação direta dos modos de falha;
- Investigação do comportamento desses elementos em situação de incêndio, analisando a influência da degradação das propriedades mecânicas do aço e dos gradientes térmicos na estabilidade global de seções celulares monossimétricas híbridas;
- Estudo do comportamento de vigas alveolares monossimétricas híbridas com outros tipos de aberturas na alma, como as geometrias casteladas (hexagonais) e senoidais (tipo Angelina), para verificar a influência do alvéolo na rigidez à torção;
- Desenvolvimento de análises paramétricas para a proposição de ajustes em formulações normativas, visando a verificação da segurança de perfis com mesas de diferentes dimensões e resistências;
- Análise do comportamento de vigas celulares monossimétricas híbridas mistas de aço e concreto, avaliando a contribuição da laje na restrição à flambagem lateral com torção e a eficiência em seções com hibridismo;
- Investigação do comportamento de vigas celulares monossimétricas híbridas mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

## REFERÊNCIAS

- ABAQUS® , User's Manual, Dessault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2021.
- AGUIAR, L. A. **Análise Paramétrica Sobre Procedimentos Para Dimensionamento De Vigas Alveolares De Aço**, 2023. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.
- ALPSTEN, G. A. Thermal residual stresses in hot-rolled steel members. 1968, **Fritz Laboratory Reports**. Paper 329.
- ALPSTEN, G. A.; TALL, L. Residual stresses in heavy welded shapes. **AWS 50th Annual Meeting held in Philadelphia**, Pa, 1969.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360-22** - Specifications for Structural Steel Buildings. p. 1–780, 2022.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC 370-21 - Specifications for Structural Stainless Steel Buildings. p. 1–612, 2021.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC Steel design guide 31: Castellated and cellular beams design**. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2024.
- BALLIO, G.; MAZZOLANI, F. M. **Theory and design of steel structures**. Chapman and Hall. London, 1983.
- BEER, H. E SCHULZ, G., The theoretical bases of the new column curves of the European Convention of Constructional Steelwork. **Constructional Metallique**, No. 3, p. 37-57, 1970.
- BEZERRA, E. M. **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- BHAT, R. A.; GUPTA, L. M. Behaviour of hybrid steel beams with closely spaced web openings. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 1, p. 93–100, 2020. Acesso em: 8/8/2025.
- BJORHOVDE, R. AND TALL, L., Maximum Column Strength and the Multiple Column Curve Concept, **Fritz Engineering Laboratory Report** No. 337.29, Lehigh University, Bethlehem, 1971.
- BJORHOVDE, R. **Deterministic and probabilistic approaches to the strength of steels columns**. Bethlehem. Thesys (Ph. D.) - Department of Civil Engineering , Lehigh University. Bethlehem, 1972.

BJORHOVDE, R.; BROZZETTI, J. ; ALPSTEN, G. A. ; TALL, L. Residual stresses in thick welded plates. **Welding Journal (AWS)**, Vol.51, No. 51, p. 329-405, 1972.

BOISSONNADE, N.; NSEIR, J.; SOMJA, H. Experimental and numerical investigations towards the lateral torsional buckling of cellular steel beams. **Thin-Walled Structures**, v. 195, p. 111388, 2024. Acesso em: 24/8/2024.

Bradford, Mark & Liu, Xinpei. (2016). Flexural-torsional buckling of high-strength steel beams. **Journal of Constructional Steel Research**. 124. 122-131. 10.1016/j.jcsr.2016.05.009.

CARVALHO, A. **Avaliação da Estabilidade Lateral de Perfis I de Aço Inoxidável de Alta Resistência com Aberturas Sequenciais na Alma em Padrão Senoidal**, 2023. Dissertação, Universidade Estadual de Maringá.

CEN. **EUROCODE 3 EN 1993-1-1: 2022** - Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings – Eurocode 3, 2022.

CEN. **EUROCODE 3 EN 1993-1-1: 2025**: Design of steel structures - Part 1-14: Design assisted by finite element analysis. Eurocode 3, 2025.

CEN. **EUROCODE 3 ENV 1993-1-1:1992** - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. (DRAFT FOR DEVELOPMENT). 1992.

CHRÓSCIELEWSKI, J.; CYWIŃSKI, Z.; SMOLEŃSKI, W. Postbuckling behaviour of hybrid plate girders with web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 18, n. 2, p. 165–170, 1991. Acesso em: 29/6/2024.

DA SILVA, L. S.; GOMES, J. O., Jr.; FERREIRA FILHO, J. O.; CARVALHO, H. Ayrton-Perry approach for the lateral-torsional buckling resistance of mono-symmetric I-section beams. **Thin-Walled Structures**, v. 211, p. 113125, 2025. Acesso em: 8/10/2024.

DE OLIVEIRA, J. P.; CARDOSO, D. C. T.; SOTELINO, E. D. Elastic flexural local buckling of Litzka castellated beams: Explicit equations and FE parametric study. **Engineering Structures**, v. 186, p. 436–445, 2019. Acesso em: 11/8/2025.

DESAI, R. B.; KHATRI, A. P. Performance of laterally unrestrained hybrid cellular steel beams. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 8, p. 2755–2765, 2023. Acesso em: 10/3/2024.

DJALALY, H. Étude de la résistance ultime des barres comprimées – flambement simple. **Construction Métallique**, No.1, 1977.

EARLS, C. J. Effects of material property stratification and residual stresses on single angle flexural ductility. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 51, n. 2, p. 147–175, 1999.

EARLS, C. J.; SHAH, B. J. High performance steel bridge girder compactness. **J. Constr. Steel Res.**, v. 58, n. 5–8, p. 859–880, 2002.

ELKAWAS, A.A.; HASSANEIN, M.F.; ELCHALAKANI, M. Lateral-torcional buckling strength and behaviour of high-strength steel corrugated web girders for bridge construction. **Thin-Walled Struct.**, v. 122, p. 112-123, 2018.

FARES, S.S., Coulson, J., Dinehart, D.W. (2016). **AISC Steel Design Guide 31: Castellated and Cellular Beam Design**, American Institute of Steel Construction (Chicago). Federal de Viçosa. Viçosa.

FERREIRA, Felipe Piana Vendramell, **Flambagem lateral com torção em vigas celulares de aço por meio da modificação da distribuição das tensões residuais** / Felipe Piana Vendramell Ferreira. - Dissertação, Maringá, 2019.

FLORES, R. **Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads**, 2009. Tese, Universitat Politècnica de Catalunya.

FRUCHTENGARTEN, J. **Sobre o Estudo da Flambagem Lateral de Vigas de Aço por Meio da Utilização de uma Teoria Não Linear Geometricamente Exata**, 2005. Dissertação,

GALAMBOS, T. V. Inelastic lateral buckling of beams. Proc. ASCE, Vol. 89 (ST5), 1963. Publication N° 236 (63-20) (1963). **Fritz Laboratory Reports**. Paper 1340.

GALAMBOS, T.V. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**, 4° Ed., A. Wiley – Interscience, 1988.

GOMES, C. A. B. **Resistência a compressão de perfis H laminados de abas paralelas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto UFOP. Ouro Preto.

GRILO, L. **Formulação para Determinação da Força Cortante Resistente de Flambagem do Montante de Alma em Vigas Celulares de Aço**, 2018. Dissertação, .

GUO, J.; SHI, Q.; LI, T.; MA, G. Mechanical performance of hybrid high-strength steel composite cellular beam under low cyclic loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 203, p. 107801, 2023.

HECHLER, O. *et al.* “Investigations on beams with multiple regular web openings”, Architectural Engineering Conference: USA: 2006.

KANG, LAN & Meng, Liuchen & Lin, Yiwei. (2020). Experimental and numerical investigation of lateral torcional buckling behavior and capacity of welded Q460 beams. **Journal of Constructional Steel Research**. 172. 106166. 10.1016/j.jcsr.2020.106166.

KERDAL D, Nethercot DA. **Failure modes for castellated beams**. Journal Constructive Steel Research, 1984; 4:295-315.

KERDAL D, Nethercot DA. **Lateral torsional buckling of castellated steel beams-design of test beams**. Research report no.BE22/2/065/2, submitted to DTP, BED, September 1978.

KERDAL D. **Lateral torsional buckling of castellated steel beams**. Phd thesis, University of Sheffield, UK, November 1982.

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

LAWSON, R. M.; HICKS, S. J. **Design of Composite Beams With Large Web Openings**. Berkshire: SCI, 2011.

LEBASTARD, M.; COUCHAUX, M.; BUREAU, A.; HJIAJ, M. Lateral-torsional buckling of uniform and tapered welded I-section beams. **Engineering Structures**, v. 303, p. 117301, 2024.

MORKHADE, S. G.; JAGTAP, K. R.; GHORPADE, P. S.; AHIWALE, D. D.; NAJM, H. M. Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 23, n. 8, p. 1277–1290, 2022.

MORKHADE, S. G.; KSHIRSAGAR, M.; DANGE, R.; PATIL, A. Analytical study of effect of web opening on flexural behaviour of hybrid beams. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 4, p. 537–547, 2019.

NADJAI, A.; Goodfellow, N.; Vassart, O.; Ali, F.; Choi, S. **Simple calculation method of composite cellular beams at elevated temperatures**. Fifth International Conference on Structures in Fire: 551-559; 2008

NAGARAJA RAO, N.; ESTUAR, F.; TALL, L. Residual stresses in welded shapes. The Welding Journal, Vo. 43, July 1964, p. 295-s. Publication N°. 241 (64-4) 1964. **Fritz Laboratory Reports**. Paper 64.

NETHERCOT, D. A.; KERDAL, D. Lateral torsional buckling of castellated steel beams. **The Structural Engineer**, v. Vol. 60B. N. 3, 1982.

OKUBO T, Nethercot DA. **Web post strength in castellated beams**. Proc Inst Civ Eng 1985; 79:533-57.

OKUBO, T.; NETHERCOT, D. Web post strength in castellated steel beams. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 79, n. 3, p. 533–557, 1985.

OLIVEIRA, L. **Procedimentos para Definição das Características Geométricas de Vigas Alveolares de Aço para Sistemas de Piso e de Cobertura**, 2012. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa.

PANEDPOJAMAN, P.; SAE-LONG, W.; CHUB-UPPAKARN, T. Cellular beam design for resistance to inelastic lateral–torsional buckling. **Thin-Walled Structures**, v. 99, p. 182–194, 2016.

PEREIRA, CAIO LOPES. **Simulação computacional do comportamento estrutural de vigas celulares mistas de aço e concreto com perfil monossimétrico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2022.

PIMENTA, R. J., **Proposição de uma curva de flambagem para perfis I soldados formados por chapas cortadas a maçarico**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte.

RICLES, J. M.; SAUSE, R.; GREEN, P. S. High-strength steel: implications of material and geometric characteristics on inelastic flexural behavior. **Engineering Structures**, v. 20, p. 323-335, 1998.

ROSSI, A. et al. Assessment of lateral distortional buckling resistance in welded I-beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 166, 2020a.

ROSSI, A. et al. Reassessment of lateral torsional buckling in hot-holled I-beams. **Structures**, v. 26, n. March, p. 524–536, 2020b.

ROSSI, A. et al. The influence of structural and geometric imperfections on the LDB strength of steel–concrete composite beams. **Thin-Walled Structures**, v. 162, n. October 2020, p.07542, 2021.

ROSSI, A. **Flambagem Lateral com Torção e Distorção da Alma em Vigas de Perfis I Metálicos Duplamente Simétricos**, 2018. Dissertação.

ROSSI, A.; MARTINS, C. H.; NICOLETTI, R. S.; DE SOUZA, A. S. C. Reassessment of lateral torsional buckling in hot-holled I-beams. **Structures**, v. 26, p. 524–536, 2020. Acesso em: 8/7/2024.

SALAH, W. A. Performance of Hybrid Castellated Beams. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 12, n. 2, p. 8444–8451, 2022.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. **Steel Structures: Design and Behavior : Emphasizing Load and Resistance Factor Design**. Prentice Hall, 1996.

SECSTEEL. .Disponível em: <<https://www.steelbyspace.com/>>. Acesso em: 10/2/2025.

SEHWAIL, M. M.; CELIKAG, M. Inelastic Behavior of Hybrid Cellular Steel Beams Made from Hot-Rolled Parent Sections. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 49, n. 10, p. 13297–13314, 2023.

SEHWAIL, M. M.; CELIKAG, M. Load Carrying Capacity of Hot-Rolled Hybrid Cellular Steel Beams: Experimental Investigations. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 47, n. 10, p. 12633–12648, 2022.

SHEEHAN, T.; DAI, X.; LAM, D.; et al. Experimental study on long spanning composite cellular beam under flexure and shear. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 116, p. 40–54, 2016.

SHOKOUHIAN, M.; SHI, Y. Flexural strength of hybrid steel I-beams based on slenderness. **Engineering Structures**, v. 93, p. 114–128, 2015.

SILVEIRA, E. **Avaliação do Comportamento de Vigas Alveolares de Aço com Ênfase nos Modos de Colapso por Plastificação**, 2021. Dissertação.

SONCK, D. **Global buckling of castelled and cellular steel beams and columns**. (Phd thesis) p.349 Ghent University, 2014.

SONCK, D.; BELIS, J. Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**. v.105, p.119-128, 2015.

SONCK, D.; VAM IMPE, R.; BELIS, J. Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and catellated members. **Construction and Building Materials**. v.54, p.512-519, 2014.

SONCK, D.; VAN IMPE, R. Study of residual stresses in I-section members and cellular members. Proceedings of the Annual Stability. Conference Structural Stability Research Council. St. Louis, Missouri, 2013.

SONCK, D.; VAN LANCKER, B.; BELIS, J. Influence of residual stresses on the global buckling resistance of cellular and catellated members. Proceedings of the Annual Stability. Conference Structural Stability Research Council. Nashville, Tennessee, 2015.

SONCK, D.; VANLAERE, W.; VAN IMPE, R. Influence of plasticity on lateral-torsional buckling behavior of cellular beams. **Materials Research Innovations**. v.15, p.158-161, 2011.

SPOORENBERG, R.C.; SNIJDER, H.H.; HOENDERKAMP, J.C.D. Proposed residual stress model for roller bent steel wide flange sections. **Journal of Constructional Steel Research**. v.66, p.992-1000, 2011.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **AS 4100** steel structures. Sydney, Australia; 1990 R-2020, 2020.

TANKOVA, T.; RODRIGUES, F.; LEITÃO, C.; MARTINS, C.; SIMÕES DA SILVA, L. Lateral-torsional buckling of high strength steel beams: Experimental resistance. **Thin-Walled Structures**, v. 164, p. 107913, 2021.

TEBEDGE, N.; ALPSTEN, G.; TALL, L. Residual-stress measurement by the sectioning method. SESA – Spring Meeting held in Cleveland, 1973.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of Elastic Stability**. Courier Corporation, 2009.

TKALČEVIĆ, V.; Džeba I.; Androić B; “Proracun saćastih nosača prema Eurokodu 3”, Građevinar, Vol. 58, 2006, pp. 709-716.

TSAVDARIDIS, K. D.; MCKINLEY, B.; CORFAR, D.-A.; LAWSON, R. M. Cellular beam end-posts with two connection types, end notches and infill plates. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 215, p. 108547, 2024. Acesso em: 3/10/2024.

VELJKOVIC, M.; JOHANSSON, B. Design of hybrid steel girders. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, n. 3–5, p. 535–547, 2004. Acesso em: 5/02/2024.

VERÍSSIMO, G. S.; PAES, J. L. R.; FAKURY, R. H.; RODRIGUES, F. C. **Estudo de vigas de aço alveolares fabricadas a partir de perfis laminados brasileiros**. Relatório de Pesquisa - Projeto TEC-APQ-01429-08. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2010.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em**

**vigas casteladas de aço**. 2015. 239p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).

XIONG, G. et al. Experimental and numerical studies on lateral torsional buckling of welded Q460GJ structural steel beams. **Engineering Structures**, v. 126, p. 1–14, 2016.

XIONG, G. et al. Lateral-torsional buckling behaviour of 690 MPa high strength steel beams. **Structures**, v. 33, n. July, p. 3999–4010, 2021.

XIONG, G. et al. Lateral–torsional buckling behaviour of welded Q690 steel I-beams with double lateral restraints along the length. **Thin-Walled Structures**, v. 170, n. November 2021, 2022.

YANG, Y.; ZHANG, Z. Analysis of lateral-torsional buckling of Q460 high strength steel welded I-section beams. J. Xi'an Univ. **Archit. Technol.**, v. 46, n. 5, p. 651–659, 2014. (in Chinese).

YOUNG, B. W. Residual stresses in hot rolled members. **IABSE**. (23), 1975.

ZDENĚK KALA, JAN VALEŠ, Imperfection sensitivity analysis of steel columns at ultimate limit state, **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, Volume 18, Issue 4, 2018, Pages 1207-1218, ISSN 1644-9665, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.009>.

ZIEMIAN, R. D. (ED.). **Guide to stability design criteria for metal structures**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

FERREIRA, F. P. V.; ROSSI, A.; MARTINS, C. H. Lateral-torsional buckling of cellular beams according to the possible updating of EC3. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 153, p. 222–242, 2019.