



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**COMPORTAMENTO E CAPACIDADE RESISTENTE DE
VIGAS CELULARES EM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA**

VÍTOR AUGUSTO PAZIN

São Carlos, 26 de setembro de 2025



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Vítor Augusto Pazin

**COMPORTAMENTO E CAPACIDADE RESISTENTE DE VIGAS
CELULARES EM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Prof. Dra. Silvana De Nardin

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Piana Vendramell Ferreira

São Carlos, 26 de setembro de 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Vítor Augusto Pazin, realizada em 26/09/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Silvana de Nardin (UFSCar)

Profa. Dra. Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani (UFES)

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (UERJ)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedico este trabalho aos meus pais, Cláudio e Silmara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais, Cláudio e Silmara, por sempre acreditarem em mim e me fornecerem suporte em todas as fases da minha vida. O apoio, amor, acolhimento e carinho de vocês foram imprescindíveis durante toda esta trajetória.

A minha orientadora, Professora Dra. Silvana De Nardin, por ter depositado confiança em mim e me apoiado desde o início da minha trajetória como seu orientado. Agradeço-lhe pelo enriquecimento científico e pessoal que pude obter ao longo deste período. Sou imensamente grato por todos os momentos.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Felipe Piana Vendramell Ferreira, principalmente pelo auxílio durante toda a modelagem numérica e pelo suporte na verificação dos modelos. Agradeço também pela atenção e confiança depositada em mim.

Ao meu orientador no exterior, Professor Dr. Konstantinos Daniel Tsavdaridis, por ter me recebido de braços abertos para realizar pesquisa ao seu lado. Sou grato pela carta de aceite, pela transferência de conhecimento e pela atenção durante a minha estadia em Londres.

Ao Professor Dr. Robert Mark Lawson por ter contribuído com a descrição da aplicação dos aços de alta resistência em vigas celulares e por ter indicado estratégias de utilização.

A todos os meus amigos e colegas que contribuíram direta ou indiretamente durante a minha trajetória na pós-graduação. Em especial, às amigadas que construí na UFSCar, Lorayne e Mariana. Outro agradecimento especial ao Douglas, por todas as conversas, risadas e momentos enriquecedores de estudo, situações das quais lembrarei pelo resto da minha vida.

Ao grupo de Construções Metálicas e Mistas (CMM) do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos números 2024/12417-8 e 2023/12901-4 referente às bolsas concedidas durante o período no exterior e no Brasil, respectivamente.

PAZIN, V.A. **Comportamento e capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência**. 117 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2025.

RESUMO

As vigas celulares de aço são caracterizadas por perfis com aberturas sequenciais circulares na alma, resultando em elementos estruturais com possibilidade de vencer grandes vãos, maior rigidez à flexão e velocidade de construção. Mundialmente, os estudos de vigas celulares se limitam, em grande parte, a aços de resistência comum. No Brasil, são escassos e recentes os estudos sobre este tipo de viga. Assim, o uso de aços de alta resistência, cuja resistência ao escoamento supere 460 MPa, em vigas celulares é um tema praticamente inexplorado até o momento. O emprego de aços de alta resistência agrega aspectos sustentáveis devido à redução da pegada de carbono. Embora seu uso em vigas celulares seja interessante do ponto de vista estrutural e de sustentabilidade, tais aços não são abordados pela NBR 8800 (ABNT, 2024). O mesmo acontece com as vigas celulares. A presente pesquisa tem o objetivo de investigar a influência da variação da resistência do aço nos modos de falha e comportamento estrutural de vigas celulares de aço de alta resistência na configuração biapoiada. Para isso, vigas celulares foram modeladas por meio do *software* ABAQUS® e os resultados foram comparados com os procedimentos de cálculo da norma BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024). Dada à inexistência de dados experimentais sobre vigas celulares em aço de alta resistência, a validação do modelo numérico foi realizada em duas etapas: considerando vigas de alma cheia em aço de alta resistência e vigas celulares de aço comum. A análise de sensibilidade de imperfeições geométricas e tensões residuais em vigas celulares de aço de alta resistência mostrou que a influência das tensões residuais diminui à medida que a resistência do aço aumenta. Além disso, os resultados indicaram que o modelo de tensão residual que considera o processo de fabricação de vigas celulares de aço comuns pode ser usado com eficácia para descrever tensões residuais em vigas celulares de aço de alta resistência. O estudo paramétrico produziu resultados que indicaram que o aumento da resistência do aço pode alterar o modo de falha, visto que modelos numéricos que apresentaram interação entre instabilidades locais e globais, podem apresentar apenas instabilidades globais conforme o aumento da classe de aço. O emprego de aços de alta resistência mostrou-se mais relevante em vigas celulares menos esbeltas, nas quais modos de falha locais governaram a capacidade resistente. Para vigas mais esbeltas, a efetividade foi reduzida, uma vez que o incremento na capacidade última se mostrou frequentemente marginal em comparação ao aumento da resistência do aço. A utilização de montantes de alma reduzidos em função do pequeno espaçamento entre aberturas, aliada à ausência de enrijecedores, pode conduzir à ocorrência de FMA devido aos esforços de compressão.

Palavras-chave: Vigas celulares de aço, Aços de alta resistência, Instabilidade, Simulação numérica, Tensões residuais, Imperfeições geométricas.

ABSTRACT

Steel cellular beams are characterized by profiles with sequential circular openings in the web, resulting in structural elements capable of spanning large distances, providing greater flexural stiffness, and enabling faster construction. Worldwide, studies on cellular beams are largely limited to normal strength steels. In Brazil, research on this type of beam is scarce and relatively recent. Thus, the use of high-strength steels, with yield strength exceeding 460 MPa, in cellular beams remains unexplored. The application of high-strength steels contributes to sustainability due to the reduction of the carbon footprint. Although their use in cellular beams is attractive from both structural and sustainability perspectives, such steels are not addressed by NBR 8800 (ABNT, 2024). The same limitation applies to cellular beams. This research aims to investigate the influence of steel strength variation on the failure modes and structural behavior of high-strength steel cellular beams under simply supported conditions. For this purpose, cellular beams were modeled using the ABAQUS® software, and the results were compared with the design procedures of BS EN 1993-1-3 (ECS, 2024). Given the lack of experimental data on high-strength steel cellular beams, the numerical model validation was conducted in two stages: considering high-strength steel solid-webbed beams and cellular beams made of normal strength steel. The sensitivity analysis of geometric imperfections and residual stresses in high-strength steel cellular beams showed that the influence of residual stresses decreases as steel strength increases. Moreover, the results indicated that the residual stress model accounting for the manufacturing process of normal strength steel cellular beams can be effectively applied to describe residual stresses in high-strength steel cellular beams. The parametric study demonstrated that increasing steel strength may alter the failure mode, as numerical models exhibiting interaction between local and global instabilities may develop only global instabilities as steel grade increases. The use of high-strength steels proved more relevant for less slender cellular beams, in which local failure modes governed the load-bearing capacity. For slenderer beams, effectiveness was reduced, as the increase in resistance capacity was often marginal compared to the gain associated with the higher strength steel. Furthermore, the use of reduced web-posts due to closely spaced openings, combined with the absence of stiffeners, may lead to the occurrence of web-post buckling under compressive stresses.

Keywords: Steel cellular beams, High-strength steel, Buckling, Numerical modeling, Residual stresses, Geometric imperfections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fabricação de viga celular.....	13
Figura 1.2 – Exemplos de aplicação	14
Figura 1.3 - Comparativo entre as <i>strings</i> de busca na base <i>Scopus</i>	17
Figura 1.4 - Fluxograma da metodologia	18
Figura 2.1 - Fluxograma PRISMA.....	23
Figura 2.2 - Variação do número de publicações	25
Figura 2.3 - Nuvem de palavras	25
Figura 2.4 - Índice de publicações por revista.....	26
Figura 3.1 – Sequência de fabricação de viga celular	31
Figura 3.2 – Parâmetros geométricos do perfil celular.....	32
Figura 3.3 – Limitações geométricas recomendadas por ACB (2020).....	33
Figura 3.4 – Instabilidade Lateral com Torção (FLT).....	34
Figura 3.5 - Instabilidade lateral com torção em viga celular	34
Figura 3.6 - Instabilidade no Montante de Alma (FMA)	35
Figura 3.7 - FMAV em viga celular	35
Figura 3.8 - Distorção da alma	37
Figura 3.9 - Formação de rótulas plásticas	38
Figura 4.1 - Tipos de diagrama tensão-deformação	40
Figura 4.2 - Magnitude e distribuição de tensões residuais em diferentes perfis laminados	40
Figura 4.3 - Distribuição de tensões residuais em perfil I laminado	41
Figura 4.4 - Modelo de distribuição de tensões residuais para vigas celulares	44
Figura 4.5 - Imperfeição geométrica em viga castelada	46
Figura 4.6 - Imperfeição geométrica no montante de alma	47
Figura 5.1 – Curvas de resistência (EC3 <i>buckling curves</i>).....	50
Figura 6.1 - Análise de estabilidade elástica (Buckling).....	54
Figura 6.2 - Instabilidade bifurcacional	55
Figura 6.3 - Modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017) adotado para o aço comum.....	57
Figura 6.4 - Modelo I (descontínuo)	58
Figura 6.5 - Modelo II (contínuo)	58
Figura 6.6 - Graus de liberdade e representação do elemento S4R	59
Figura 6.7 - Discretização dos modelos numéricos	60
Figura 6.8 – Critérios C1 e C2	60
Figura 6.9 - Fluxograma de módulos (ABAQUS)	62
Figura 6.10 – Condições de contorno das vigas celulares	64
Figura 6.11 – Resposta carga x deslocamento dos modelos numéricos de vigas celulares	66
Figura 6.12 – Modos de falha das vigas celulares	68
Figura 6.13 - Condições de contorno das vigas de alma cheia em aço de alta resistência.....	70
Figura 6.14 – Resposta de carga x deslocamento dos modelos numéricos de vigas de alma cheia em aço de alta resistência	71
Figura 6.15 - Modo de colapso experimental caracterizado por FLT (viga B350-0.5-1/3)	74

Figura 7.1 – Fluxograma para análise de sensibilidade de vigas celulares em aço comum e vigas de alma cheia em aço de alta resistência	77
Figura 7.2 – Fluxograma para análise de sensibilidade de vigas celulares em aço de alta resistência.....	78
Figura 7.3 - Razões <i>PEXP/PNUM</i> para vigas celulares sob diferentes modelos de tensões residuais e amplitudes de imperfeições geométricas.....	79
Figura 7.4 – Avaliação do comportamento força-deslocamento para cada modelo de viga celular	80
Figura 7.5 – Razões <i>PEXP/PNUM</i> para vigas de alma cheia sob diferentes modelos de tensões residuais e amplitudes de imperfeições geométricas	82
Figura 7.6 – Avaliação do comportamento força-deslocamento para cada modelo de viga de alma cheia em aço de alta resistência	83
Figura 7.7 – Capacidade resistente da viga IPE330 para várias imperfeições e classes de aço	85
Figura 7.8 – Influência da classe de aço no comportamento força-deslocamento para o modelo de viga celular IPE330.....	86
Figura 7.9 – Fluxograma do segundo estudo paramétrico	88
Figura 7.10 – Condições de carregamento	89
Figura 7.11 – Densidade de malha e condição de contorno	90
Figura 7.12 – Valores de momento crítico numérico	91
Figura 7.13 – Relação entre M_{cr} numérico e normativo em função do vão	92
Figura 7.14 – Comparação entre resultados do EC3 e numérico para M_{cr}	92
Figura 7.15 – Comparação da capacidade resistente do modelo numérico em relação ao EC3 para força concentrada no meio do vão.....	94
Figura 7.16 – Resultados da modelagem numérica de vigas sujeitas à força concentrada.....	97
Figura 7.17 – Comparação da capacidade resistente do modelo numérico em relação ao EC3 para força uniformemente distribuída	99
Figura 7.18 – Resultados da modelagem numérica de vigas sujeitas à força uniformemente distribuída.....	101
Figura 7.19 – Influência da classe de aço na capacidade resistente de vigas celulares	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Apresentação da estrutura de dados sistemáticos.....	21
Tabela 2.2 – Fase inicial de pesquisa.....	22
Tabela 3.1 – Limitações dimensionais apresentadas por ACB (2020).....	32
Tabela 4.1 - Modelos de distribuição de tensões residuais em perfis laminados.....	42
Tabela 4.2 - Modelos de distribuição de tensões residuais em perfis em aço de alta resistência.....	45
Tabela 5.1 – Seleção das curvas de resistência para casos gerais	51
Tabela 6.1 - Processamento inicial referente à malha de 10mm.....	61
Tabela 6.2 – Características dos modelos numéricos de viga celular em aço comum	64
Tabela 6.3 - Características dos modelos numéricos de viga de alma cheia em aço de alta resistência	71
Tabela 6.4 - Síntese da validação do modelo numérico	75
Tabela 7.1 - Influência do padrão de tensões residuais na capacidade resistente de vigas celulares	79
Tabela 7.2 – Influência do padrão de tensões residuais na capacidade resistente de vigas de alma cheia em aço de alta resistência	82
Tabela 7.3 - Valores de força última do modelo IPE330 para diferentes imperfeições e classes de aço	85
Tabela 7.4 – Parâmetros geométricos das vigas celulares para o estudo paramétrico	88
Tabela 7.5 – Propriedades da seção transversal dos perfis utilizados	88
Tabela 7.6 – Propriedades mecânicas do aço A913.....	89
Tabela 7.7 – Intervalos de esbeltez para cada classe de aço e modo de falha dos modelos submetidos à força concentrada no meio do vão	98
Tabela 7.8 – Intervalos de esbeltez para cada classe de aço e modo de falha dos modelos submetidos à força uniformemente distribuída.....	102

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	17
1.3 Metodologia	18
1.4 Estrutura da dissertação	18
2. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	20
2.1 Condução da Revisão Sistemática	20
2.2 Desenvolvimento	20
2.3 Resultados e discussões	24
2.4 Conclusões relativas a RSL	30
3. VIGAS CELULARES DE AÇO	31
3.1 Processo de fabricação e geometria	31
3.2 Comportamento estrutural	33
3.2.1 Instabilidade Lateral com Torção (FLT).....	33
3.2.2 Instabilidade no Montante de Alma (FMA)	34
3.2.3 Distorção da Alma (DA)	36
3.2.4 Mecanismo de Vierendeel (MV)	37
3.2.5 Síntese dos achados.....	38
4. TENSÕES RESIDUAIS E IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS	39
4.1 Tensões residuais	39
4.1.1 Tensões residuais em perfis laminados	40
4.1.2 Tensões residuais em perfis fabricados em aço de alta resistência	44
4.2 Imperfeições Geométricas	46
5. PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS.....	48
5.1 Procedimentos Existentes	48
5.2 Capacidade resistente à FLT.....	48
5.3 Capacidade resistente à FMA	51
6. MODELAGEM NUMÉRICA	53
6.1 Descrição das análises realizadas.....	53
6.1.1 Análise de Estabilidade Elástica	53
6.1.2 Análise Não Linear.....	54
6.2 Propriedades físicas	55
6.3 Discretização do modelo numérico: tipos de elementos finitos e densidade de malha	59
6.4 Condições de contorno e vinculações	61
6.5 Validação e calibração do modelo numérico	61
6.5.1 Modelagem numérica das vigas celulares em aço comum	63

6.5.2	Modelagem numérica das vigas de alma cheia em aço de alta resistência.....	69
6.6	Síntese de resultados de validação	75
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
7.1	Estudo paramétrico 1 - Tensões residuais e imperfeições geométricas: Análise de sensibilidade	76
7.1.1	Sensibilidade de vigas celulares em aço comum	78
7.1.2	Sensibilidade de vigas de alma cheia em aço de alta resistência	81
7.1.3	Sensibilidade de vigas celulares em aço de alta resistência	84
7.2	Estudo paramétrico 2 - Capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência	87
7.2.1	Análise de estabilidade elástica	90
7.2.2	Análise não linear: força concentrada no meio do vão	93
7.2.3	Análise não linear: força uniformemente distribuída	98
7.2.4	Análise não linear: uso de aços de alta resistência em vigas celulares.....	102
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
8.1	Conclusões	104
8.2	Sugestão para futuros estudos	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1. INTRODUÇÃO

O aço é amplamente utilizado em diversos setores, inclusive na construção civil, quer seja em edificações estruturadas por este, ou outros materiais. Elementos de aço são utilizados na forma de barras de treliças, pilares e vigas. O aço é um material que apresenta comportamento similar à tração e à compressão e, portanto, valores idênticos de resistência à compressão e à tração. Contudo, em elementos estruturais de aço ocorrem modos de falha que vão além do escoamento, podendo haver falhas associadas às instabilidades locais e globais, sobretudo na presença de esforços de compressão. O aumento das esbeltezes local e global reduz a capacidade resistente do elemento estrutural, tornando-o mais suscetível às falhas por instabilidade.

Estruturas formadas predominantemente por elementos de aço apresentam rapidez de execução e montagem, menores dimensões e peso próprio e maior precisão dimensional comparadas a sistemas estruturais em concreto armado. A agilidade de execução relaciona-se à dispensa de fôrmas e escoramentos, bem como à industrialização de processos e componentes. Outra vantagem da utilização de elementos estruturais em aço está ligada ao processo de produção dos componentes, que ocorre em fábricas, com mão de obra especializada e monitoramento do processo, resultando em maior controle de qualidade.

A norma brasileira ABNT NBR 8800 (2024) define os aços para uso estrutural, perfis laminados possuem resistência ao escoamento de pelo menos 250 MPa. Além disso, a mesma norma limita a resistência ao escoamento de aços estruturais a 450 MPa. É corriqueiro o uso de aços com resistência ao escoamento máxima de 450 MPa na composição de sistemas estruturais em aço, os quais são denominados **aços comuns**. Segundo Tankova *et al.* (2022), o limite inferior de resistência ao escoamento para aços de alta resistência é de 460 MPa. Normas como ANSI/AISC 360 (2022), EN 10025 (2004) e, AS/NZS 3678 (2016) restringem-se ao uso de perfis laminados com resistência ao escoamento limitada a 550 MPa, 960 MPa e 450 MPa, respectivamente.

O emprego do aço de alta resistência em sistemas estruturais é uma estratégia para aumentar a capacidade resistente do elemento estrutural quando há limitações geométricas que impedem o aumento da seção transversal. Assim, é possível aumentar a capacidade resistente com o aumento da resistência do aço. Comparado ao aço comum, o uso de aços de alta resistência reduz as emissões totais de CO₂ devido a diminuição no consumo de aço, além de reduzir o peso próprio da estrutura, reduzindo o volume de concreto na fundação (LE *et al.*, 2020).

A expansão da seção é outra forma de aumentar a capacidade resistente. No entanto, isto leva a um aumento na altura do perfil de aço. Portanto, esta solução só é viável do ponto de vista arquitetônico quando não há limitações na altura da viga. Com a finalidade de manter o peso próprio e o consumo de aço sem alteração do material constituído, surgem modelos de vigas casteladas. São consideradas vigas casteladas aquelas com aberturas sequenciais ao longo da alma, fabricadas a partir do corte térmico e solda, objetivando a expansão da seção transversal, e conseqüentemente, maior rigidez à flexão (FERREIRA, 2021). Esse processo é denominado de castelação. A fabricação deste elemento permite um ganho de altura (e, conseqüente aumento considerável de inércia) na região expandida soldada, sem aumento do consumo de aço.

Os furos sequenciais podem ter geometria diversa e a nomenclatura dos perfis depende da geometria dos furos. Assim, as vigas com aberturas sequenciais na alma são classificadas em casteladas, celulares e angelinas[®]. Entende-se por vigas celulares, aquelas que apresentam aberturas sequenciais circulares na alma (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Fabricação de viga celular



Fonte: Grilo (2018)

O uso de vigas celulares resulta em aspectos estéticos e de desempenho estrutural bastante interessantes. Por exemplo, a utilização deste elemento facilita a passagem de instalações prediais como tubulações elétricas, hidrossanitárias etc. A Figura 1.2 ilustra exemplos de aplicação dos perfis com aberturas sequenciais.

Figura 1.2 – Exemplos de aplicação



(a) Stamford Bridge, Londres/Reino Unido



(b) Battersea Power Station, Londres/Reino Unido



(c) Itaú Cultural, São Paulo/Brasil



(d) Exchange House, Londres/Reino Unido

Fonte: Autor (2025)

Entretanto, as vigas celulares de aço apresentam uma questão mais complexa do ponto de vista estrutural em comparação com as vigas com alma cheia. Devido às aberturas na alma, modos de falha específicos precisam ser investigados.

Dessa forma, a presente dissertação reúne aspectos relevantes para a modernização da construção civil nacional, uma vez que a redução do consumo de materiais e de mão de obra se alia à inovação dos modelos estruturais que podem ser empregados no Brasil. Além disso, ao utilizar aços com maior resistência, é possível reduzir o impacto ambiental gerado pelo processo de fabricação do aço. Considerando a baixa utilização de vigas celulares no país, seja pelo desconhecimento por parte dos engenheiros, seja pela ausência de normativas específicas, este trabalho contribui para o avanço e a modernização do setor da construção civil brasileira, além de elucidar o comportamento e capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência.

1.1 Justificativa

Edificações estruturadas em aço apresentam características desejáveis como a dispensa de fôrmas, a possibilidade de vencer grandes vãos, o uso de diferentes tipos de perfil, material com elevado controle tecnológico e elementos estruturais com alta precisão dimensional. Vigas de aço são amplamente utilizadas como parte da solução estrutural quando há necessidade de vencer grandes vãos. Para aumentar a capacidade resistente de um elemento estrutural em aço, pode-se alterar o tipo de perfil ou as dimensões da seção transversal. Estas mudanças podem ser inviabilizadas por imposições arquitetônicas. Além disso, estas alternativas podem aumentar o peso próprio e o consumo de aço da estrutura. A outra possibilidade para aumentar a capacidade resistente do perfil de aço consiste em utilizar aços com maior resistência ao escoamento.

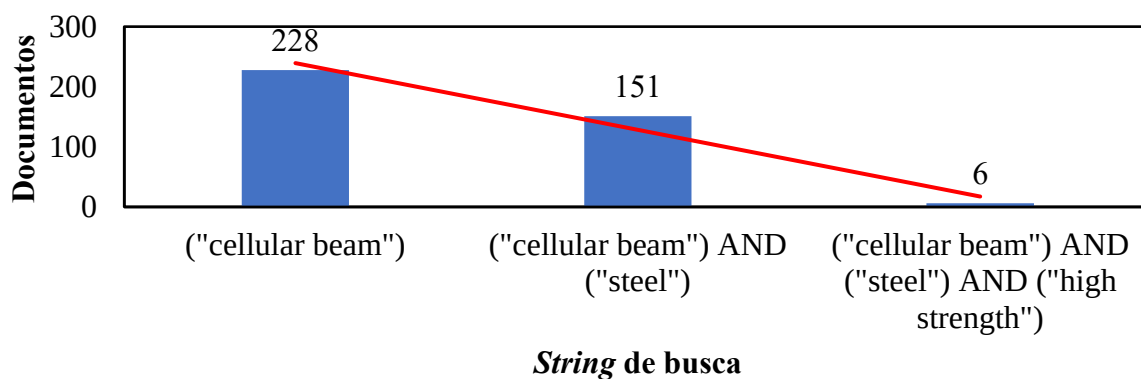
A fim de aumentar a capacidade resistente de vigas de aço, mantendo as principais viabilidades deste elemento, a utilização de vigas com aberturas sequenciais na alma é uma alternativa interessante. De forma a reduzir ainda mais o consumo de aço e a geometria do perfil, é relevante associar à utilização de aços de alta resistência em vigas celulares.

A norma brasileira ABNT NBR 8800 (2024) não aborda perfis em aço de alta resistência. Além disso, quanto às aberturas na alma, há um procedimento de verificação específico para a região do furo, todavia, não são abordados elementos estruturais com aberturas sequenciais. A abordagem se refere apenas a furos isolados e não sequenciais.

O estudo e a aplicação de vigas celulares em aço comum não são recentes, contudo, o estudo do perfil celular em aço de alta resistência é uma lacuna de conhecimento a ser investigada. Buscas na base de dados *Scopus* (Figura 1.3), realizadas em agosto de 2023, considerando os termos “*cellular beam*” e “*cellular beam*” AND “*steel*” retornaram 228 e 151

documentos, respectivamente. Contudo, ao adicionar o termo “*high strength*”, resultaram apenas 6 documentos, sendo que nenhum destes foi desenvolvido no Brasil. Assim, o uso de aços de alta resistência em perfis celulares representa um campo do conhecimento em fase inicial de desenvolvimento que justifica a presente proposta.

Figura 1.3 - Comparativo entre as *strings* de busca na base Scopus



Fonte: Autor (2025)

Além disso, esta proposta complementa o estudo da capacidade resistente de vigas celulares desenvolvido por Ferreira (2021) [processo FAPESP nº 2018/22803-1]. Portanto, trata-se de um assunto relevante, com elevado grau de ineditismo e que produziu resultados que contribuem para elucidar o comportamento e a capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência.

1.2 Objetivos

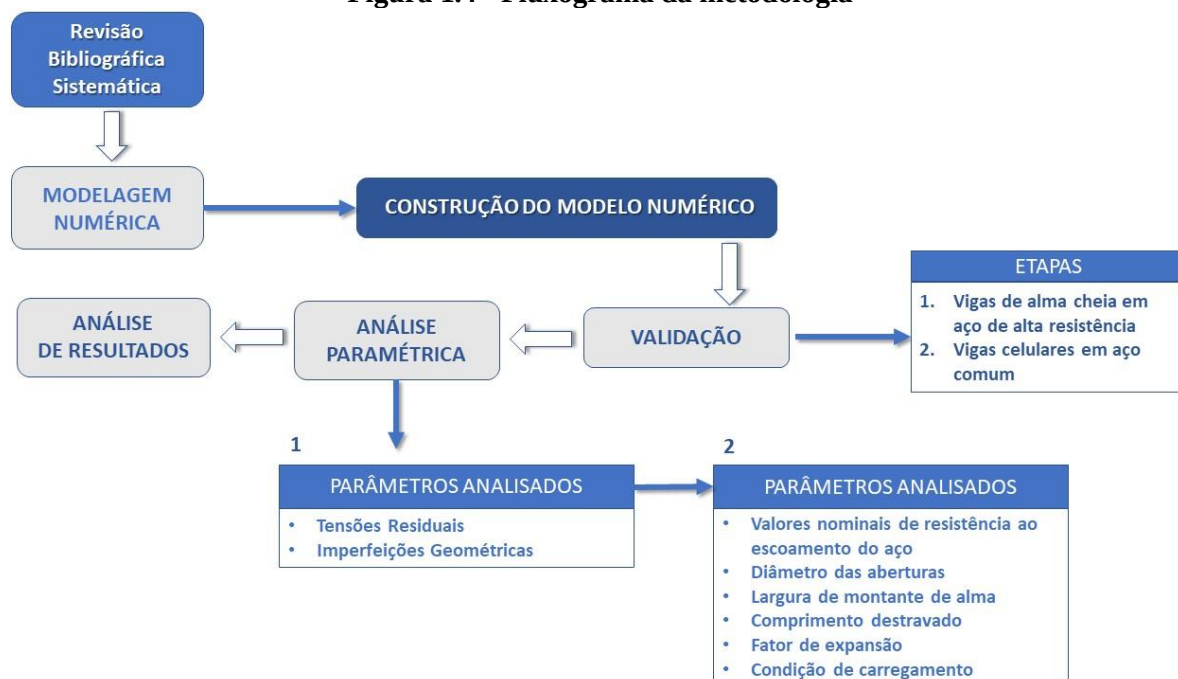
A presente dissertação teve como objetivo principal avaliar a capacidade resistente de vigas celulares biapoiadas sem restrição lateral e, confeccionadas em aço de alta resistência. Partindo deste objetivo geral, os seguintes objetivos específicos nortearam este estudo:

1. Analisar a influência de diversas distribuições de tensões residuais no comportamento de vigas celulares biapoiadas confeccionadas em aço de alta resistência;
2. Investigar a influência da resistência ao escoamento do aço no comportamento e capacidade resistente de vigas celulares biapoiadas com ênfase nas fases elástica e inelástica;
3. Avaliar a influência de parâmetros geométricos como diâmetro das aberturas, montante de alma, comprimento destravado e fator de expansão, bem como das condições de carregamento no comportamento e na capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência (AAR).

1.3 Metodologia

A metodologia foi subdividida em duas etapas principais: Revisão Sistemática de Literatura e Modelagem Numérica. A estratégia utilizada é mostrada na Figura 1.4 e inclui as seguintes fases: revisão sistemática de literatura, construção de modelos numéricos, validação por meio de comparação com resultados experimentais da literatura, análise paramétrica e análise de resultados.

Figura 1.4 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor (2025)

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho foi estruturado em oito capítulos. O **capítulo 1** apresenta a introdução da temática de pesquisa e a sua contextualização, trazendo a justificativa baseada na problemática de pesquisa, além da delimitação dos objetivos geral e específicos e descrição da metodologia de trabalho. O **capítulo 2** contém a primeira fase da metodologia, a Revisão Sistemática de Literatura, por meio da qual se identifica a lacuna de conhecimento a respeito do estudo de vigas celulares e fundamenta o estado da arte. O estado da arte de vigas celulares de aço bem como os principais modos de falha são apresentados no **capítulo 3**. No **capítulo 4** é discutida a natureza e distribuição das tensões residuais, bem como o conceito de imperfeição geométrica. Na sequência, no **capítulo 5** são apresentados e discutidos os procedimentos de cálculo disponíveis para verificação estrutural das vigas celulares de aço, fundamentando-se

principalmente na norma europeia. O **capítulo 6** traz descrição detalhada sobre todo o processo de modelagem numérica no ABAQUS, ilustrando desde a etapa de construção do modelo numérico até a validação com base em resultados disponíveis na literatura. No **capítulo 7** são apresentados e discutidos os resultados do estudo paramétrico; são contemplados tanto a sensibilidade dos modelos numéricos a diferentes modelos de tensões residuais e imperfeições geométricas quanto os resultados referentes à variação paramétrica dos modelos numéricos. Por fim, o **capítulo 8** apresenta as principais conclusões e considerações finais.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a conduta da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) em conjunto com a meta-análise dos documentos referentes ao comportamento e capacidade resistente de vigas celulares de aço.

2.1 Condução da Revisão Sistemática

A adoção de uma abordagem científica transparente e replicável distingue a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) de outras narrativas tradicionais (MENGIST; SOROMESSA; LEGESE, 2020). O planejamento do protocolo de pesquisa é o passo inicial e principal para a conduta correta e consistente da RSL. A efetividade da busca de documentos depende desta primeira etapa em que hipótese, objetivos e temática de pesquisa devem estar previamente definidos.

Também denominada Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), este método de busca de documentos parte da busca em bases de dados. A identificação, elegibilidade, seleção e inclusão de documentos são etapas associadas aos termos de busca (*strings*). Previamente definem-se critérios de aceitabilidade dos documentos encontrados (critérios de exclusão ou inclusão). O tratamento estatístico realizado através da meta-análise permite que a RSL englobe aspectos qualitativos e quantitativos.

Foi utilizada a metodologia PRISMA para identificar os principais estudos relacionados à temática de pesquisa. O processo de extração de dados por meio desta metodologia segue as quatro etapas apresentadas anteriormente (identificação, elegibilidade, seleção e inclusão). A conduta desta RSL visa investigar lacunas de conhecimento, apresentando os principais documentos relacionados ao comportamento e capacidade resistente de vigas celulares de aço.

2.2 Desenvolvimento

O primeiro passo foi a definição do protocolo de busca. Granth e Both (2009) apresentam uma metodologia expressiva de busca (SALSA) que engloba a busca dos documentos, avaliação, síntese e análise. De forma a complementar o protocolo, Menghist, Soromesa e

Legese (2020) associaram em um relatório os resultados provenientes do estudo sistemático à meta-análise (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Apresentação da estrutura de dados sistemáticos

Passo	Resultado	Método
Protocolo	Definição do escopo do estudo	Apenas o comportamento e capacidade resistente de vigas celulares de aço
Pesquisa	Definição de pesquisa e estratégia	Pesquisa de strings
	Pesquisa de documentos	Pesquisa em bases de dados
Avaliação	Seleção de documentos	Definição de critérios de inclusão e exclusão
Síntese	Qualidade dos documentos	Definição de critérios de qualidade
	Extração de dados	Modelo de extração de dados
	Categorização de dados	Categorização dos dados na definição iterativa e preparação para trabalhos de análise adicionais
Análise	Análise de dados	Categorias quantitativas, descrição e análise narrativa dos dados organizados
	Resultados e discussão	Ilustração de tendências e identificação de lacunas, além de resultados comparação com base na análise de dados
Relatório	Conclusão	Apresentação de conclusões e recomendações
	Redação do relatório	Metodologia PRISMA
	Produção de artigo de pesquisa	Resumo do resultado do relatório para o público em geral

Fonte: Adaptado de Menghist, Soromesa e Legese (2020)

Nesta fase inicial de pesquisa, não foram atribuídos filtros. Com isso, os resultados apresentados na Tabela 2.2 incluem artigos, capítulos de livro, enciclopédias, periódicos de revisão, dentre outros. Ressalta-se que definição das bases de dados e *strings* de busca foram arbitrárias, considerando como inclusão global e detalhista de dados relacionados à temática atribuída. A RSL foi realizada em outubro de 2023, com isso, os dados apresentados são fundamentados e relacionados com a data mencionada.

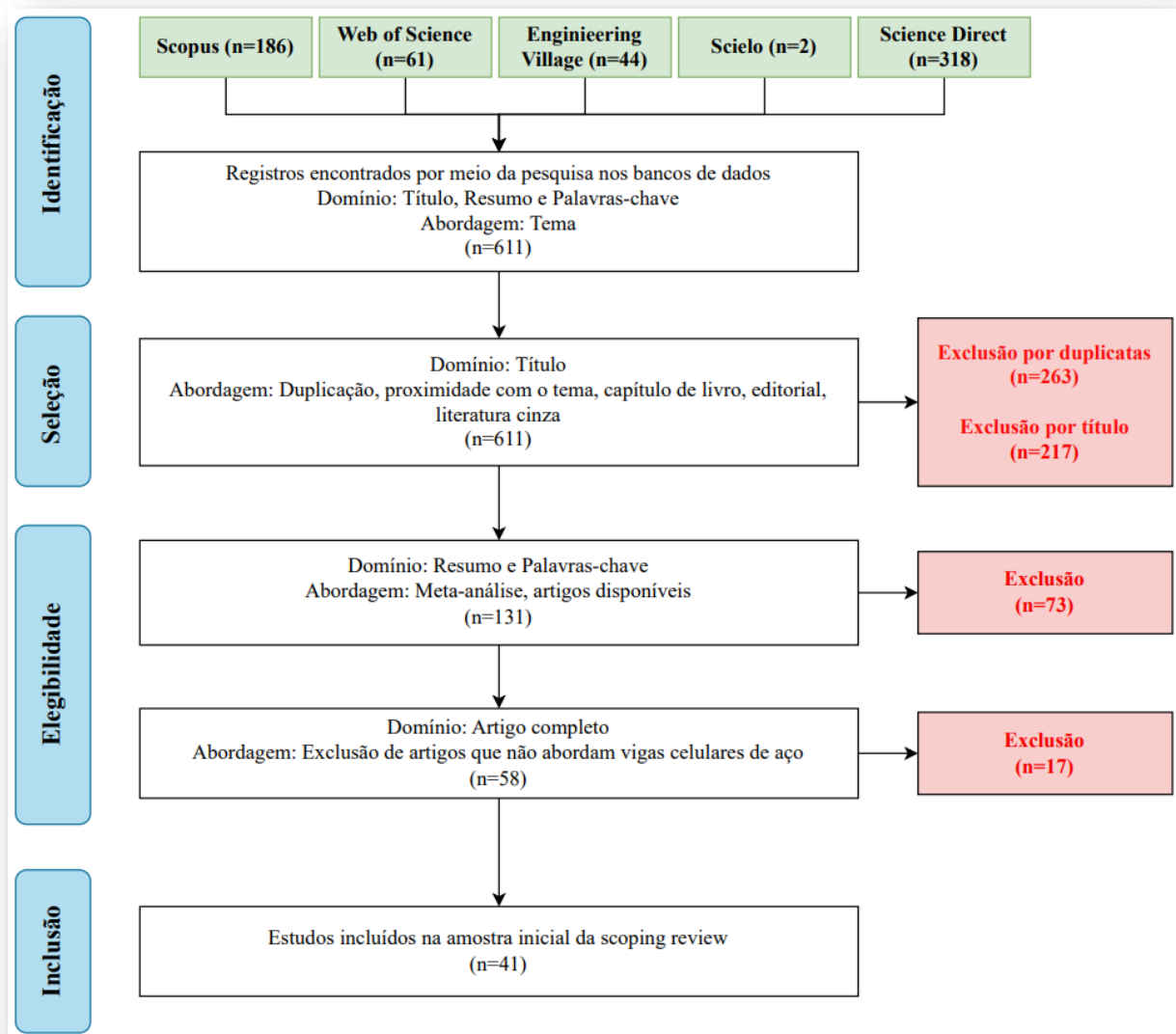
Tabela 2.2 – Fase inicial de pesquisa

Base de dados	Strings	Número de documentos	Data de aquisição
Scopus	“cellular beam” AND “steel”	155	18/10/2023
	“steel cellular beam”	18	18/10/2023
	“cellular beam” AND “steel” AND “high strength”	7	18/10/2023
	“steel cellular beam” AND “high strength”	1	18/10/2023
	“cellular beam” AND “steel” AND “high strength” AND “buckling”	4	18/10/2023
	cellular beam AND “steel” AND “high strength” AND “lateral-torsional buckling”	1	18/10/2023
Web of Science	“cellular beam” AND “steel”	59	19/10/2023
	“cellular beam” AND “steel” AND “high strength”	2	19/10/2023
	cellular beam AND “steel” AND “high strength” AND “buckling”	0	19/10/2023
Engineering Village	“cellular beam” AND “steel”	43	19/10/2023
	“cellular beam” AND “steel” AND “high strength”	1	19/10/2023
Scielo	“cellular beam” AND “steel”	0	19/10/2023
	“cellular beam”	0	20/10/2023
	viga celular	2	20/10/2023
Science Direct	“cellular beam” AND “steel”	219	24/10/2023
	“cellular beam” AND “steel” AND “high strength” AND “buckling”	53	27/10/2023
	“cellular beam” AND “steel” AND “high strength” AND “lateral-torsional buckling”	46	27/10/2023

Fonte: Pazin, Ferreira e De Nardin (2024)

A organização dos documentos foi realizada seguindo as quatro fases do processo de extração (Figura 2.1), conforme apresentado por Moher *et al.* (2010). A metodologia PRISMA foi associada à meta-análise. A aplicação metodológica de uma RSL permite uma análise comparativa abrangente e conclusões fundamentadas nos dados coletados (ALIYAH *et al.*, 2023).

Figura 2.1 - Fluxograma PRISMA



Fonte: Pazin, Ferreira e De Nardin (2024)

Como pode ser observado pela Figura 2.1, a primeira fase (identificação) retornou 611 documentos sem atribuição de critério de exclusão, resultantes da inserção das *strings* nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, *Engineering Village*, *Scielo* e *Science Direct*, conforme apresentado pela Tabela 2.2. Após a remoção de arquivos duplicados (263) e análise do domínio do título, foram excluídos mais 217 documentos, finalizando a fase de “seleção” com 131 registros. Partindo para fase de “elegibilidade”, foi realizada a leitura do resumo e palavras-chave e atribuindo os seguintes critérios de exclusão:

1. Capítulos de livro;
2. Documentos do tipo “index”;

3. Enciclopédias;
4. Periódicos de revisão;
5. Artigos relacionados ao estudo do comportamento de pilares e colunas celulares
6. Estudos com relação à característica morfológica ou celular de determinado material;
7. Vigas com outros tipos de abertura (exclusivamente angelinas, casteladas ou elípticas);
8. Vigas celulares com reforço de qualquer tipo;
9. Artigos sobre estruturas sob ação de sismos;
10. Artigos relacionados a estruturas em situação de incêndio;
11. Artigos com foco em estruturas mistas;
12. Artigos utilizando modelagem numérica ou análise experimental a respeito de ligações;
13. Estudo de vigas celulares com variação da altura de seção transversal;
14. Artigos com foco principal em análise estatística utilizando redes neurais artificiais ou algoritmos.

Após a atribuição dos critérios de aceitabilidade, excluíram-se mais 73 documentos. Com isso, a leitura do artigo completo foi realizada, o que resultou na remoção de mais 17 arquivos, finalizando esta fase com 58 artigos. Finalmente, na fase final (inclusão) foram selecionados 41 artigos.

2.3 Resultados e discussões

Ao final da *scoping review* pôde-se mapear o panorama de pesquisa considerando a temática apresentada. Com isso, incluíram-se os principais artigos publicados em revistas de alto impacto, cujo tema de pesquisa é diretamente relacionado ao comportamento e à capacidade resistente de vigas celulares de aço. Neste contexto, observou-se a tendência de publicações e o avanço de estudos relativos ao tema (Figura 2.2).

Observou-se um aumento de interesse relativo à temática de pesquisa, apresentando 2020 como o ano com mais publicações. Também é notável que, embora 2015 tenha sido um ano significativo em termos de publicações, o decaimento quantitativo de pesquisas em 2016, 2017 e 2018 é evidenciado. Salienta-se que o número de publicações referentes ao ano de 2023 é limitado na contabilização até o mês de outubro.

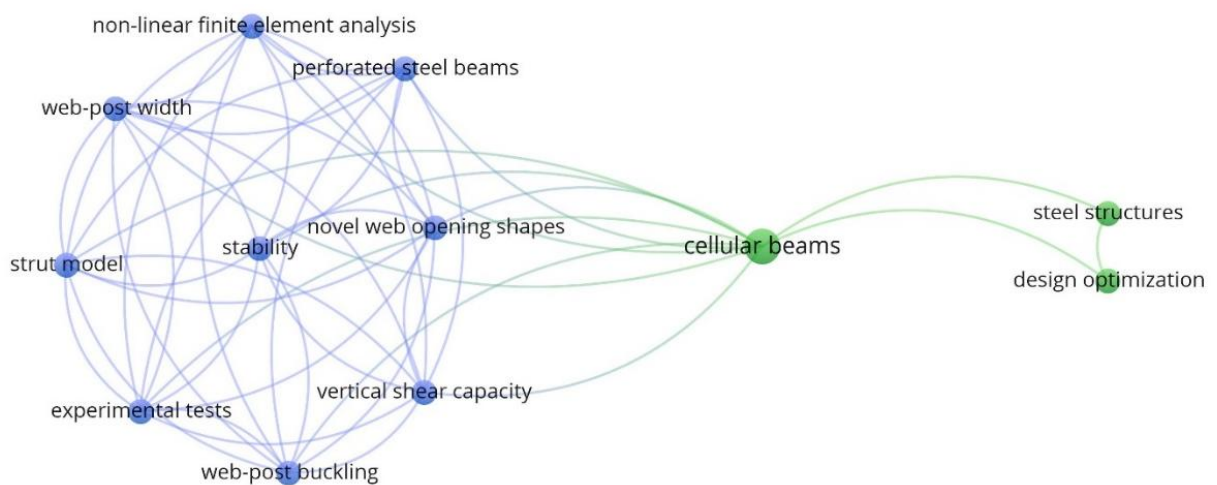
Figura 2.2 - Variação do número de publicações



Fonte: Pazin, Ferreira e De Nardin (2024)

Adicionalmente, foi realizada uma análise bibliométrica acerca da identificação e ocorrência de principais palavras-chave relacionadas aos artigos evidenciados. O mapeamento foi realizado com o auxílio do *software* VOSViewer® e ilustrado através da nuvem de palavras (Figura 2.3), que retornou as 12 palavras-chave mais utilizadas, colocando em destaque os seguintes termos: *cellular beams*, *steel structures* e *stability*. Ressalta-se que a busca de documentos nas bases de dados é desempenhada principalmente por estas palavras-chave, que descrevem a visibilidade e temática de pesquisa de maneira simplificada e direta.

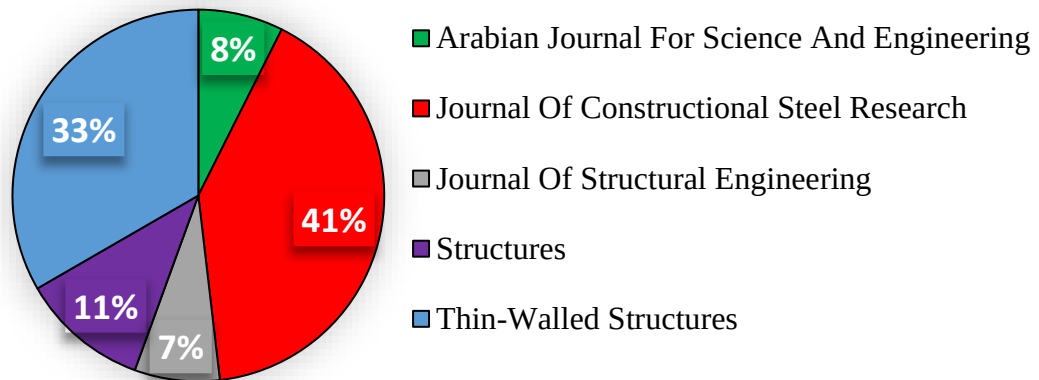
Figura 2.3 - Nuvem de palavras



Fonte: Pazin, Ferreira e De Nardin (2024)

A revista *Journal Of Constructional Steel Research* lidera o ranking de publicações com 11 artigos, seguida pelas revistas *Thin-Walled Structures* e *Strucutres*, respectivamente com 9 e 3 artigos. A Figura 2.4 ilustra o percentual de publicações referentes ao tema para os 5 periódicos com mais publicações.

Figura 2.4 - Índice de publicações por revista



Fonte: Pazin, Ferreira e De Nardin (2024)

Em relação ao comportamento e capacidade resistente de vigas celulares de aço, os 5 autores correspondentes e principais que se destacam são *Pattamad Panedpojaman*, *Ferhat Erdal*, *Konstantinos Daniel Tsavdaridis*, *Delphine Sonck* e *Robert Mark Lawson*. O Quadro 2.1 retrata os 13 principais artigos, evidenciando a participação principal destes pesquisadores relacionados a este tema.

Quadro 2.1 - Síntese dos documentos mais citados

Referência	Título, periódico e contextualização
Lawson e Basta (2019)	Título: <i>Deflection of C section beams with circular web openings</i> Periódico: <i>Thin-Walled Structures</i> São apresentadas expressões para estimar a deflexão em vigas com aberturas circulares na alma, a partir da deflexão em vigas de alma cheia. As aberturas circulares foram representadas por retângulos equivalentes de largura x profundidade igual a $0.75h_0 \times h_0$; sendo h_0 o diâmetro da abertura.
Panedpojaman, Sae-Long e Chub- Uppakarn (2016)	Título: <i>Cellular beam design for resistance to inelastic lateral-torsional buckling</i> Periódico: <i>Thin-Walled Structures</i> Traz diretrizes de <i>design</i> racional baseadas no método geral do EC3, para capacidade resistente à FLT em vigas celulares de aço. A abordagem para verificação da capacidade resistente à FLT é conservadora em relação às simulações em elementos finitos e resultados experimentais.

Erdal, Tunca e Taş (2015)	Título: <i>The comparative analysis of optimal designed web expanded beams via improved harmony search method</i> Periódico: <i>Structural Engineering And Mechanics</i> Este estudo tem como objetivo comparar o projeto ótimo de vigas casteladas e celulares, de forma a utilizar o peso mínimo. Foi sugerida a utilização de um algoritmo de busca harmônica que indica as seções ideais para viga universal, as dimensões dos furos hexagonais e circulares e o número total de aberturas ao longo da viga como variáveis de projeto.
Lawson, Basta e Uzzaman (2015)	Título: <i>Design of stainless steel sections with circular openings in shear</i> Periódico: <i>Journal of Constructional Steel Research</i> Este artigo avalia vigas celulares de aço inoxidável sujeitas à esforços de cisalhamento e flexão. Os testes experimentais realizados mostraram que a capacidade resistente ao cisalhamento em uma abertura é controlada pela compressão local em uma seção transversal radial. Com isso, é apresentada uma fórmula simplificada para a capacidade resistente à instabilidade local em torno de aberturas de alma circulares, que concorda bem com os resultados do teste realizado.
Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2015)	Título: <i>Novel simplified equations for Vierendeel design of beams with (elongated) circular openings</i> Periódico: <i>Journal of Constructional Steel Research</i> Este estudo propõe um equacionamento para verificação ao mecanismo de Vierendeel em vigas celulares de aço ou com aberturas elípticas. O método proposto é uma alternativa mais simples para a verificação ao mecanismo de Vierendeel. Além disso, o método aborda simultaneamente a combinação flexão global, cisalhamento e Vierendeel.
Sonck e Belis (2015)	Título: <i>Lateral–torsional buckling resistance of cellular beams</i> Periódico: <i>Journal of Constructional Steel Research</i> Neste estudo, avaliou-se numericamente o comportamento à instabilidade lateral com torção em vigas celulares de aço. Através do estudo paramétrico, foi proposto um projeto para estes elementos estruturais. Baseou-se na norma europeia para cálculo da capacidade resistente a FLT em vigas de seção I, todavia implementando mudanças no cálculo das propriedades de seção transversal e uma seleção de curva de resistência modificada.
Tsavdaridis e Galiatsatos (2015)	Título: <i>Assessment of cellular beams with transverse stiffeners and closely spaced web openings</i> Periódico: <i>Thin-Walled Structures</i> Um estudo paramétrico de elementos finitos foi realizado, investigando vigas celulares estreitamente espaçadas com enrijecedores transversais duplos. Foi sugerida uma distância máxima para o espaçamento entre as aberturas, a fim de otimização. Para aberturas muito pouco espaçadas, as tensões de compressão foram dadas pela capacidade resistente ao mecanismo de Vierendeel; enquanto para as aberturas de distância máxima, estas tensões foram dadas por uma analogia de biela, encontrada na norma britânica.

Panedpojaman, Thepchattri e Limkatanyu (2014)	Título: <i>Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams</i> Periódico: <i>Thin-Walled Structures</i> Este estudo propõe estimar a capacidade resistente ao cisalhamento de vigas celulares de aço simétricas e assimétricas, baseando-se no modo de falha por instabilidade no montante de alma. A modelagem numérica foi utilizada como estratégia. A profundidade dos "tês" é uma característica chave para determinação do modo de falha por instabilidade ou mecanismo de Vierendeel. O estudo relacionou a capacidade resistente de cada parte associando a área de cisalhamento vertical da seção em "tê" ao modo de falha por FMA.
Erdal e Saka (2013)	Título: <i>Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams</i> Periódico: <i>Journal of Constructional Steel Research</i> Este artigo teve como objetivo avaliar a capacidade de carga e analisar numericamente vigas celulares de aço. Para isso, foram realizados testes numéricos e experimentais. Após a realização dos ensaios experimentais, foram conduzidas análises numéricas para avaliar o comportamento não linear dos modos de falha (neste caso, instabilidade no montante de alma e mecanismo de Vierendeel).
Tsavdaridis e D'Mello (2012)	Título: <i>Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses</i> Periódico: <i>Journal of Structural Engineering</i> Análise do mecanismo de Vierendeel em vigas com diferentes (novas) aberturas sequenciais. Utilizou-se da modelagem numérica para avaliação de vigas com aberturas normatizadas e não normatizadas. O estudo concluiu que a forma, bem como a posição das aberturas, afeta diretamente o comportamento estrutural do elemento. Foram ilustrados os parâmetros influenciadores.
Erdal, Doğan e Saka (2011)	Título: <i>Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers</i> Periódico: <i>Journal of Constructional Steel Research</i> Este estudo visa otimizar o peso de vigas celulares de aço, de forma a se obter um projeto ótimo. Os algoritmos utilizados selecionam a seção ótima da viga celular submetida a um carregamento geral, considerando o diâmetro e número ótimo de aberturas. Além disso, esta seleção também é realizada de forma que as limitações do projeto sejam satisfeitas e o peso da viga celular seja mínimo.
Sonck, Vanlaere e Van Impe (2011)	Título: <i>Influence of plasticity on lateral-torsional buckling behaviour of cellular beams</i> Periódico: <i>Materials Research Innovations</i> Este trabalho investiga a regra de projeto de vigas celulares, levando em consideração os efeitos de plasticidade, além de imperfeições e não linearidade geométrica. É mostrado que a regra de projeto retorna resultados seguros quanto às geometrias analisadas.
Tsavdaridis e D'Mello (2011)	Título: <i>Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes</i>

	Periódico: <i>Journal of Constructional Steel Research</i> Estudo numérico e experimental de vigas com aberturas sequenciais (celulares e de outros tipos- novas) com a finalidade de avaliar a instabilidade no montante de alma. Constatou-se que a utilização destas vigas com aberturas não normatizadas apresentam aspectos positivos quanto ao processo de produção e manufatura quando comparadas às vigas celulares.
--	---

Dentre os 41 artigos selecionados, apenas 3 incorporam aços de alta resistência. Assim, 7% dos estudos relacionados ao comportamento estrutural de vigas celulares avaliam a mudança na classe de aço, considerando a resistência ao escoamento do aço igual ou superior a 450MPa.

Ellobody (2012) investigou o comportamento não linear de vigas celulares em aço comum (S275) e de alta resistência (S460 e S690), comparando os resultados da modelagem numérica com o procedimento sugerido pela norma australiana; os resultados mostraram que o uso de aços de alta resistência em vigas pouco esbeltas aumenta consideravelmente a sua capacidade resistente. Bhat e Gupta (2020) avaliaram numericamente a capacidade resistente de vigas celulares, considerando aços de classe S250, S350 e S450; os autores concluíram que a variação de parâmetros imposta implicou em diferentes comportamentos para as vigas celulares, sendo que as chances de falhas locais foram menores quando se usou aço de alta resistência. Shamass e Guarracino (2020) utilizaram a modelagem numérica para averiguar o comportamento, com foco em FMA, de vigas celulares em aço comum (S355) e de alta resistência (S460, S690 e S960) considerando diferentes geometrias; os autores propuseram um modelo mecânico para avaliação da FMA em vigas celulares englobando aços comuns e de alta resistência.

Através dos resultados desta RSL, constatou-se que há escassez de estudos que associam aços de alta resistência a vigas celulares. Desta forma, esta RSL evidenciou a carência de estudos, junto a uma lacuna de conhecimento significativa relacionada ao comportamento e capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência.

Uma busca atualizada em setembro de 2025 foi realizada após a RSL, com o objetivo de identificar novos documentos. Foram utilizados os termos “*cellular beam*” AND “*steel*” AND “*high strength*” nas bases de dados *Scopus* e *Science Direct*, escolhidas por retornarem o maior número de documentos (Tabela 2.2). Observou-se uma tendência crescente de pesquisas relacionadas à temática de vigas celulares; entretanto, ainda se evidencia uma lacuna de conhecimento quanto à aplicação do aço de alta resistência nesses modelos estruturais. Foram encontrados 6 documentos na *Scopus* e 26 na *Science Direct*, considerando os anos de 2024 e

2025. Ressalta-se, ainda, que embora a *Science Direct* tenha retornado, mais uma vez, um número superior de publicações, parte delas se mostrou irrelevante para a pesquisa sistemática conduzida.

2.4 Conclusões relativas a RSL

A Revisão Sistemática de Literatura desenvolvida neste capítulo contribuiu para a identificação dos principais artigos relacionados ao comportamento e capacidade resistente de vigas celulares de aço. O emprego da metodologia PRISMA associado à meta-análise, permitiu quantificar os resultados da busca e identificar 41 artigos relevantes à temática. Os autores *Pattamad Panedpojaman*, *Ferhat Erdal*, *Konstantinos Daniel Tsavdaridis*, *Delphine Sonck* e *Robert Mark Lawson*, foram identificados como os principais pesquisadores deste tema. Com relação às bases de dados utilizadas, observou-se que apesar de a *Science Direct* retornar um número elevado de documentos, estes não eram tão aderentes ao tema; isto resultou em trabalho considerável para seleção e baixa relevância.

Dentre os principais modos de falha estudados, destacam-se principalmente a instabilidade lateral com torção (FLT), mecanismo de Vierendeel (MV) e instabilidade no montante de alma (FMA). A presente pesquisa tem como foco principal, o estudo da implementação de aços de alta resistência em vigas celulares, tendo em vista a carência de dados na literatura. Os resultados da RSL se referem, em sua grande maioria, a aços comuns. Isto mostra a escassez de informações referentes a perfis celulares em aço de alta resistência e evidencia uma lacuna de conhecimento em relação a este tema.

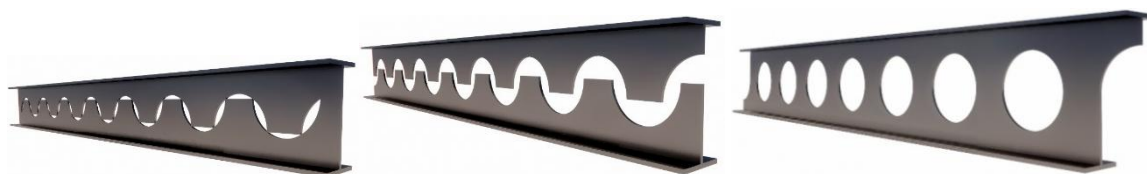
3. VIGAS CELULARES DE AÇO

Perfis celulares de aço são amplamente utilizados em países do Reino Unido e EUA. Segundo Das e Srimeni (1984), a ideia de expansão da seção transversal de vigas de aço para aumento da rigidez por meio de corte foi primeiramente apresentada em 1910 pela empresa *Chicago Bridge and Iron Works* (atualmente nomeada “*Chicago Bridge and Iron Company, CBI®*”), fundada em 1889 por Horace E. Horton em Chicago, Illinois, USA. Inicialmente, a produção destes perfis era limitada devido aos altos custos de produção e dificuldades de corte. Todavia, em 1980, com o avanço tecnológico, o estudo destes elementos tornou-se relevante. Segundo Ferreira, Martins e De Nardin (2020) em 1990, devido à redução de custos oriunda do desenvolvimento do corte automatizado, as vigas com aberturas sequenciais na alma começaram a ser produzidas nos EUA e, ainda nesta década, a patente de vigas celulares de aço firmou-se em nome de Peter A. Walker.

3.1 Processo de fabricação e geometria

A fabricação de vigas celulares de aço se dá por cortes térmicos de semicircunferências (Figura 3.1), que são posteriormente separadas e soldadas, resultando em seções transversais mais altas (expandidas) e com alvéolos circulares ao longo do comprimento. Devido à expansão, o perfil resultante apresenta maior rigidez à flexão, com aumento entre 40 e 60% em relação ao perfil original (SONCK, 2014).

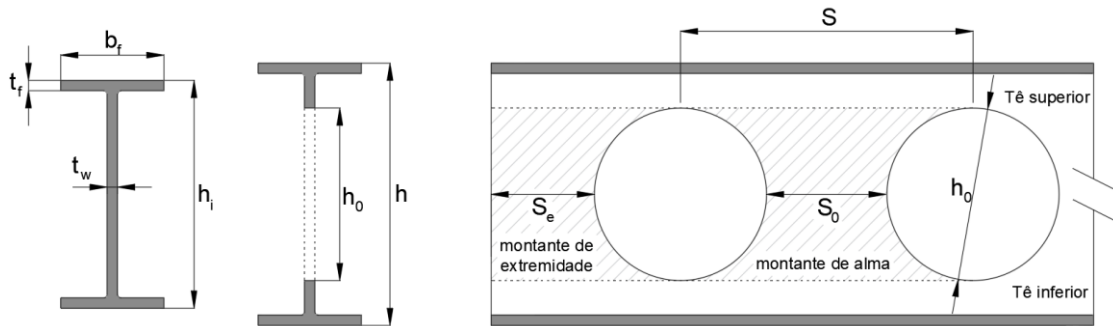
Figura 3.1 – Sequência de fabricação de viga celular



Fonte: Autor (2025)

A seção transversal I original (Figura 3.2) apresenta mesa com largura b_f e espessura t_f e altura h_i e alma com espessura t_w . A seção expandida, ou seção celular, apresenta altura total h e diâmetro da abertura h_o . Longitudinalmente, s é o passo ou distância entre centros de aberturas, S_o é distância longitudinal entre as bordas de duas aberturas adjacentes ou ainda, montante de alma e S_e é a distância entre a borda da última abertura e a extremidade do perfil ou ainda, montante de extremidade.

Figura 3.2 – Parâmetros geométricos do perfil celular



Fonte: Autor (2025).

De acordo com a ArcelorMittal - ACB (2020), as vigas celulares são divididas em dois grupos (Tabela 3.1), a depender do diâmetro dos alvéolos, comprimento e aplicação. O processo de dimensionamento/verificação apresentado pelo fabricante é função do grupo em que a viga pertence. As vigas celulares do grupo 1 são recomendadas para coberturas, passarelas e terças de grandes vãos. Neste caso, comumente é utilizado o aço classe S355 (ACB, 2020). As vigas celulares do grupo 2 se destinam a pisos ou pavimentos, estacionamentos ou garagens e estruturas *offshore*. Para este grupo as classes de aço mais utilizadas são S355, S460 e HISTAR®460. Em ambos os grupos, a utilização da viga celular visa otimizar a relação carga/peso. Para tanto, as relações geométricas da Tabela 3.1 devem ser respeitadas.

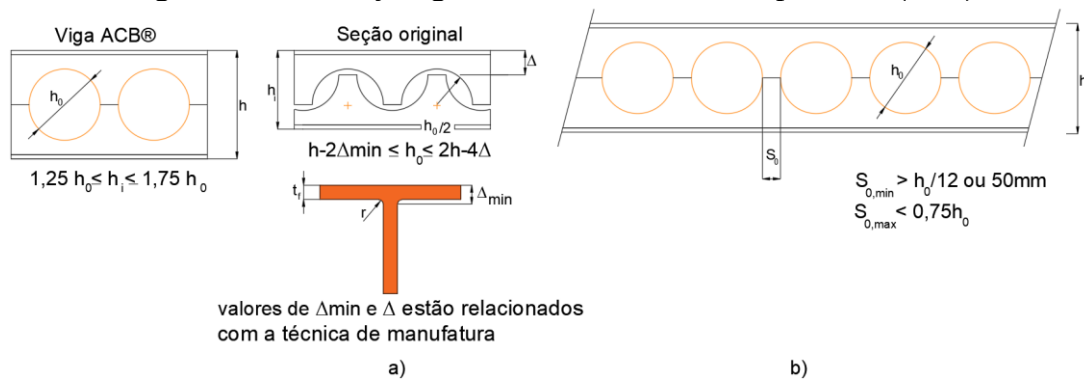
Tabela 3.1 – Limitações dimensionais apresentadas por ACB (2020)

Relações	Grupo 1	Grupo 2
Diâmetro e altura	$1h_i \leq h_o \leq 1,3h$	$0,8h_i \leq h_o \leq 1,1h$
Espaçamento e diâmetro	$1,1h_o \leq s \leq 1,3h_o$	$1,2h_o \leq s \leq 1,7h_o$
Altura expandida e original	$1,4h_i \leq h \leq 1,6h_i$	$1,3h_i \leq h \leq 1,4h_i$

Fonte: Adaptado de ACB (2020)

Para ambos os grupos, a ACB (2020) define limites geométricos para as aberturas (Figura 3.3a), bem como para a largura do montante de alma (Figura 3.3b).

Figura 3.3 – Limitações geométricas recomendadas por ACB (2020)



Fonte: Adaptado de ACB (2020)

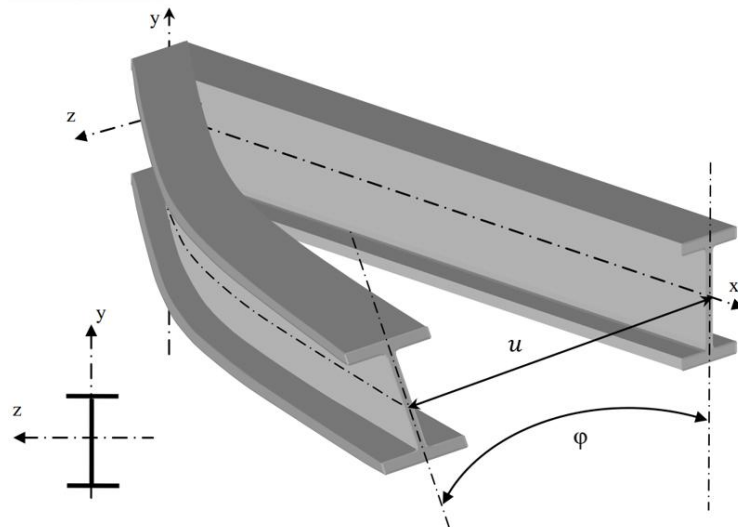
3.2 Comportamento estrutural

Com a expansão da altura da seção transversal aumenta-se o momento de inércia da seção, aumentando a rigidez à flexão; também ocorre aumento da capacidade resistente do perfil. Todavia, a presença de aberturas torna o perfil mais suscetível a fenômenos de instabilidade e aumenta a complexidade na identificação dos modos de falha. A falha pode ocorrer por: instabilidade lateral com torção (FLT), mecanismo de Vierendeel (MV), instabilidade no montante de alma (FMA), falha geral por flexão (BF), falha por cisalhamento (SF) devido à redução de aço na seção e ruptura da solda no montante de alma (SHAMASS; GUARRACINO, 2020). Ressalta-se que a existência e distribuição de tensões residuais bem como de imperfeições geométricas afetam diretamente o comportamento estrutural deste elemento, podendo reduzir sua capacidade resistente. A combinação destes fenômenos de instabilidade também pode ocorrer.

3.2.1 Instabilidade Lateral com Torção (FLT)

Vigas de aço são suscetíveis, principalmente, à FLT. Neste modo de instabilidade (Figura 3.4) a seção transversal sofre um movimento de translação lateral (u) associado a torção (ϕ). Assim, a FLT é altamente dependente do comprimento destravado da mesa à compressão (ELKAWAS; HASSANEIN; ELCHALAKANI, 2018).

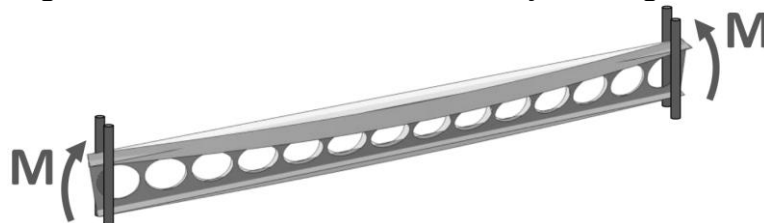
Figura 3.4 – Instabilidade Lateral com Torção (FLT)



Fonte: Adaptado de Sayed-Ahmed (2004)

A presença de aberturas em vigas celulares aumenta a vulnerabilidade a esta instabilidade do perfil (Figura 3.5). A FLT ocorre em vigas celulares de aço sujeitas à flexão em torno do eixo mais resistente, devido à falta de restrição lateral. O principal parâmetro que favorece este tipo de instabilidade é a razão entre o comprimento destravado da viga e o raio de giração em torno do eixo menos resistente (FERREIRA *et al.*, 2022).

Figura 3.5 - Instabilidade lateral com torção em viga celular



Fonte: Sonck (2014)

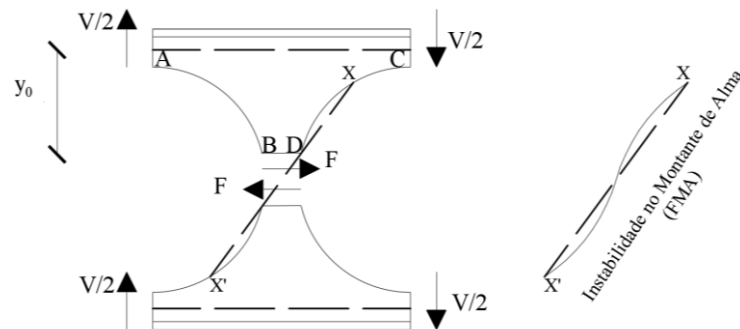
Em vigas celulares, a falha por FLT ocorre especialmente quando o banzo comprimido é instável e insuficientemente suportado quanto ao deslocamento lateral e torção (SONCK; BELIS, 2015; PANEDPOJAMAN; SAE-LONG; CHUB-UPPAKARN, 2016).

3.2.2 Instabilidade no Montante de Alma (FMA)

A instabilidade no montante de alma (FMA) é caracterizada por detalhes geométricos da viga, como diâmetro da abertura, largura do montante de alma e espessura da alma. A FMA é mais crítica em vigas celulares cujo montante de alma tem largura reduzida

(PANEDPOJAMAN; THEPCHATRI; LIMKATANYU, 2014). A Figura 3.6 ilustra a instabilidade no montante de alma por cisalhamento (FMAV), sendo V o esforço cortante global; F a força horizontal na junta soldada ocasionada pelo Mecanismo de Vierendeel (MV), como forma de equilíbrio das forças de contraflexão ocasionadas pelo cisalhamento (KERDAL; NETHERCOT, 1984); y_0 é a distância da ligação soldada ao centro geométrico da seção “tê”.

Figura 3.6 - Instabilidade no Montante de Alma (FMA)



Fonte: Adaptado de Kerdal e Nethercot (1984)

A FMAV é um fenômeno que ocorre devido à perda de estabilidade do montante de alma, em função da força cortante (GRILO, 2018). A torção, junto ao deslocamento lateral em relação ao eixo vertical no montante de alma é ilustrado pela Figura 3.6 em “ $X - X'$ ”, observa-se ainda que este comportamento se dá devido à flexão do montante de alma oriundo do esforço de tração ocasionado em “ $A - B$ ” junto ao esforço de compressão em “ $C - D$ ”. A ocorrência da FMAV pode ser visualizada na Figura 3.7a, onde ainda é possível ocorrer a ruptura na junta soldada quando a largura no montante de alma é reduzida, conforme ilustrado por Verweij (2010) na Figura 3.7 (b e c).

Figura 3.7 - FMAV em viga celular

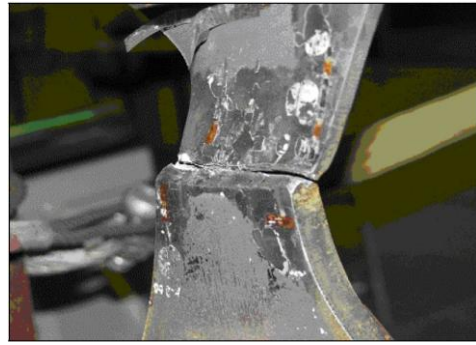


(a) Instabilidade no montante de alma por cisalhamento (FMAV)

Fonte: Grilo (2018)



(b) ruptura da solda por FMAv



(c) detalhe da ruptura da solda

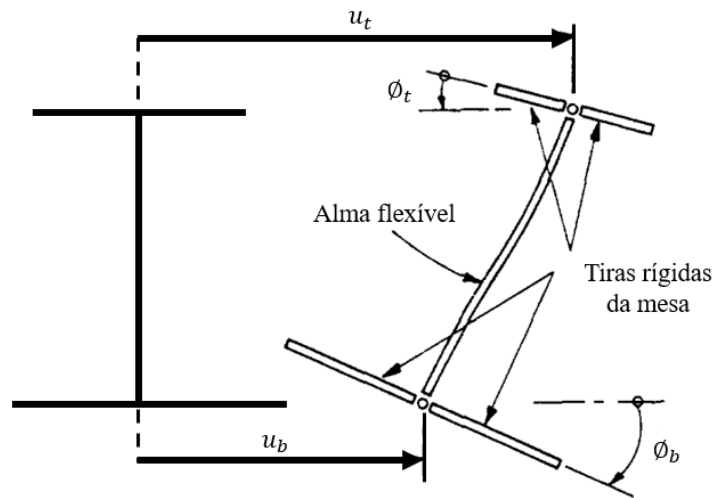
Fonte: Verweij (2010)

A instabilidade no montante de alma também pode ocorrer devido aos esforços de compressão (FMAc). Este fenômeno ocorre quando existe a compressão do montante de alma, analogamente às barras submetidas a compressão (WARD, 1990). Torna-se mais evidente quando não há presença de enrijecedores e é caracterizado pelo enrugamento do montante da alma (FERREIRA, 2021).

3.2.3 Distorção da Alma (DA)

A Distorção da Alma (DA) ocorre quando há um desvio lateral das mesas com diferentes ângulos de torção (Figura 3.8), reduzindo assim a capacidade resistente a instabilidades e efetivamente à torção (BRADFORD, 1985; ZIRAKIAN; SHOWKATI, 2006). A DA é acentuada em vigas celulares com vãos mais curtos. Isto ocorre devido à presença de aberturas pouco espaçadas, elevada esbeltez da alma e aberturas maiores (KHATRI; KATIKALA; KOTAPATI, 2021).

Figura 3.8 - Distorção da alma



u_t e u_b representam os deslocamentos transversais da mesa superior e inferior, respectivamente. Os ângulos ϕ_t e ϕ_b ilustram os ângulos de torção das mesas superior e inferior, respectivamente.

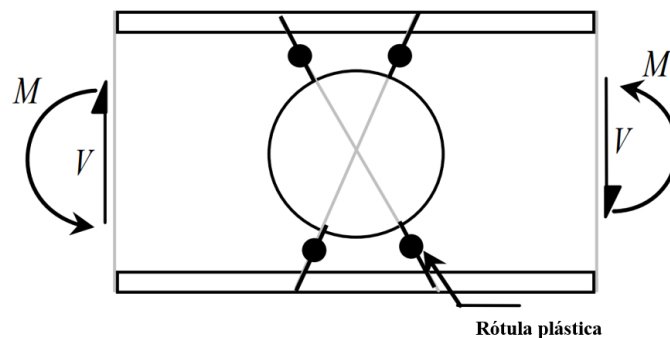
Fonte: Adaptado de Bradford (1985)

A ocorrência simultânea da mudança na geometria da seção transversal provocada pela DA e do deslocamento lateral com torção pela FLT define o modo de falha denominado FLTD, que é a combinação das falhas por FLT e DA (BADFORD, 1985).

3.2.4 Mecanismo de Vierendeel (MV)

O modo de falha caracterizado pelo Mecanismo de Vierendeel (MV) ocorre quando o aço nas extremidades dos “tês” atinge sua resistência ao escoamento devido à combinação de tensões normais e de cisalhamento (FERREIRA, 2021). Neste caso, há formação de quatro rótulas plásticas (Figura 3.9), respectivamente localizadas nas seções “tês” acima e abaixo da abertura, onde ocorre a transferência do esforço de cisalhamento lateral (V) e surgimento de momento fletor (M) através da abertura na alma (CHUNG; LIU; KO, 2001; ERDAL; SAKA, 2013).

Figura 3.9 - Formação de rótulas plásticas



Fonte: Adaptado de Panedpojaman e Rongram (2014)

Para vigas com aberturas sequenciais, deve-se considerar também a FMA como crítica, quando a largura do montante de alma for pequena, além da verificação da deflexão adicional oriunda das aberturas sequenciais (CHUNG; LIU; KO, 2001). Para concluir, o MV está associado a esforços cortantes de alta magnitude que atuam na viga, junto à formação de quatro rótulas plásticas nos cantos das aberturas e que deformam as seções dos “tês” acima das aberturas em uma forma esticada (TSAVDARIDIS; D’MELLO, 2012).

3.2.5 Síntese dos achados

O conteúdo deste capítulo mostra que vigas celulares podem apresentar diversos modos de falha. Tais mecanismos de colapso são influenciados principalmente por aspectos geométricos. As diversas falhas podem ocorrer de forma individual ou combinada, amplificando os efeitos na capacidade resistente de vigas celulares.

Com base nestes achados, este estudo se dedicou a avaliar e descrever o modo de falha predominante em vigas celulares, em função de diferentes parâmetros físicos e geométricos, com foco na avaliação da influência de cada variação no comportamento e capacidade resistente deste elemento estrutural.

Além dos parâmetros geométricos, os modos de falha também podem ser influenciados pela presença de tensões residuais e imperfeições geométricas. Estes dois tópicos são tratados no próximo capítulo.

4. TENSÕES RESIDUAIS E IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS

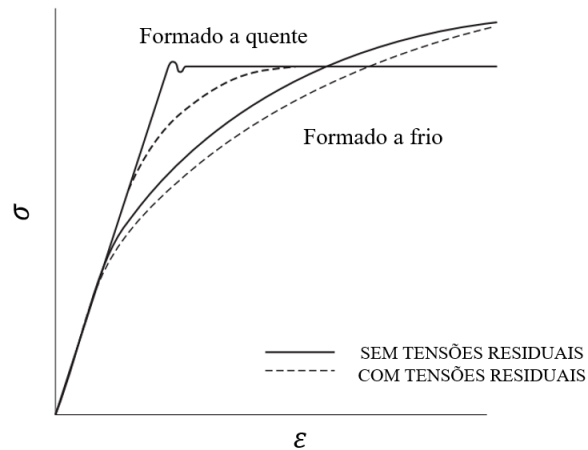
Neste capítulo são abordadas a não linearidade física, a partir das tensões residuais, além da não linearidade geométrica oriunda das imperfeições iniciais. O conceito, distribuição e contextualização das tensões residuais são abordados em diversos contextos, quer sejam, para vigas de alma cheia, celulares, em aço comum e de alta resistência. As imperfeições geométricas também serão relatadas.

4.1 Tensões residuais

As tensões residuais estão presentes em elementos de aço devido à distribuição não uniforme de deformações plásticas ou térmicas, podendo reduzir a capacidade última à compressão devido à degradação de rigidez e escoamento prematuro, além de diminuir a resistência à fadiga em elementos sob carga cíclica ou dinâmica (LI; LI; WANG, 2015). Tais tensões se distribuem ao longo do volume da estrutura; todavia, somente as componentes longitudinais de tensão distribuídas ao longo da seção transversal devem ser consideradas, pois atuam no mesmo sentido das tensões geradas pelo carregamento externo. Consequentemente, as componentes de cisalhamento de tensão residual são negligenciadas (SZALAI; PAPP, 2005; GOMES, 2006).

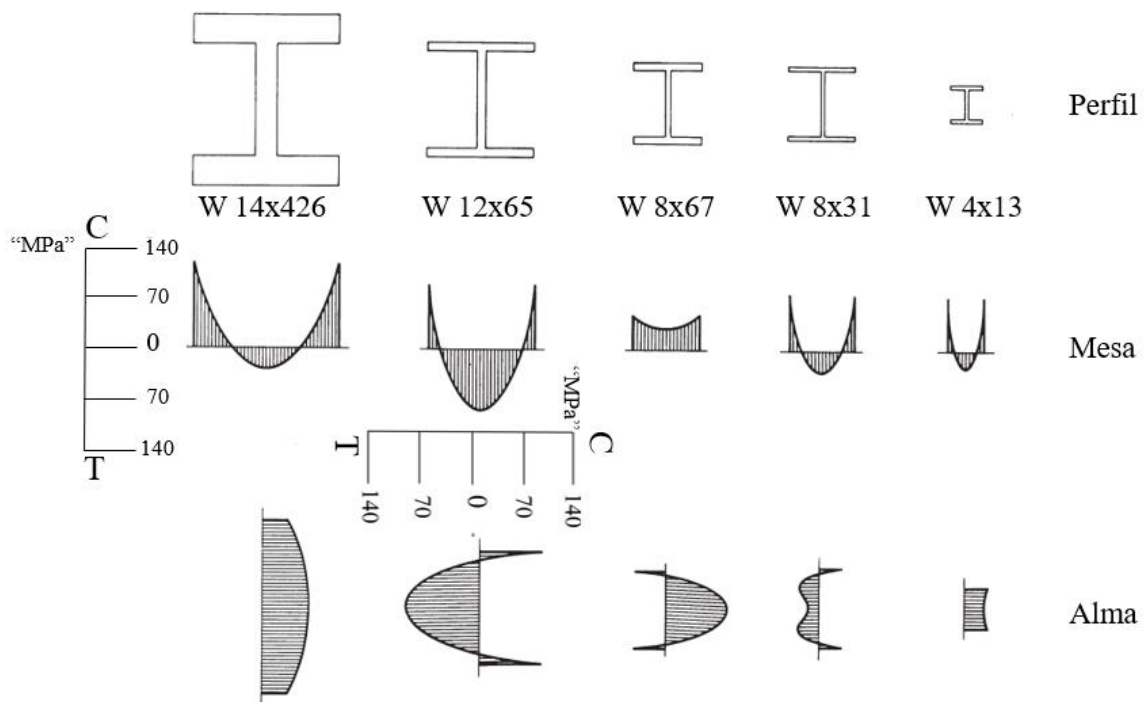
Trata-se de tensões internas intrínsecas aos elementos de aço e que estão presentes, ainda que a estrutura não tenha sofrido ação de qualquer carregamento externo. As tensões residuais surgem durante o processo de produção e são autoequilibradas, ou seja, estão em equilíbrio estático interno (SONCK; VAN IMPE, 2013). A capacidade resistente do elemento estrutural é afetada pela presença de tensões residuais (Figura 4.1) mudando as relações efetivas tensão-deformação (GALAMBOS, 1988). Em perfis formados a quente, o processo de surgimento das tensões residuais é de natureza térmica; por outro lado, nos perfis formados a frio, as tensões residuais são de natureza mecânica (SONCK; VAN IMPE, 2013). Em perfis mais robustos (Figura 4.2), as tensões residuais têm valores maiores (GALAMBOS, 1988).

Figura 4.1 - Tipos de diagrama tensão-deformação



Fonte: Adaptado de Galambos (1988)

Figura 4.2 - Magnitude e distribuição de tensões residuais em diferentes perfis laminados



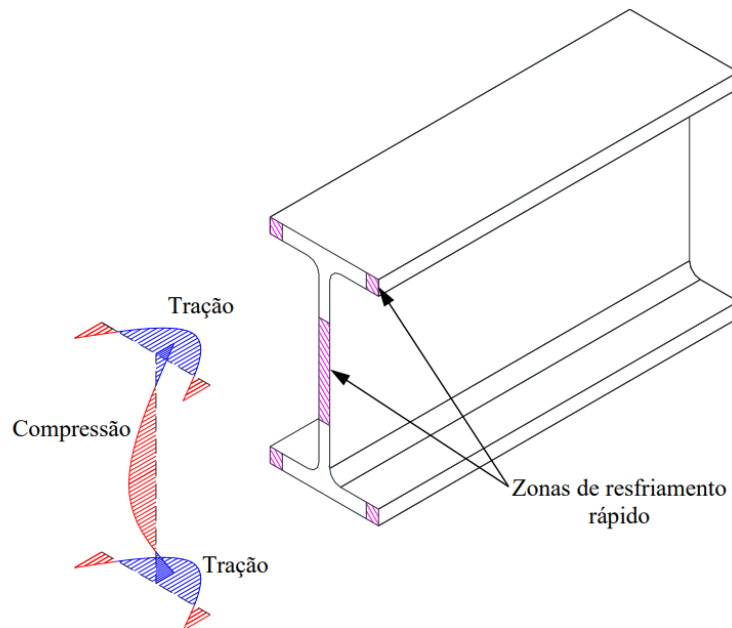
Fonte: Adaptado de Galambos (1988)

4.1.1 Tensões residuais em perfis laminados

O processo de fabricação influencia diretamente a distribuição das tensões residuais. A manufatura pode ocorrer por laminação (a frio ou a quente), conformação a frio ou soldagem. Em perfis laminados a quente, a natureza térmica das tensões residuais ocorre devido ao resfriamento não uniforme da seção transversal (ALPSTEN, 1968; LAW; GARDNER, 2012).

Dilatação e contração térmica geram gradientes de temperatura; nos trechos que resfriam lentamente surgem tensões residuais de tração, nas demais porções surgem tensões residuais de compressão (HUBER; BEEDLE, 1954; BALLIO; MAZZOLANI, 1983; GRILO, 2018). A Figura 4.3 ilustra este fenômeno.

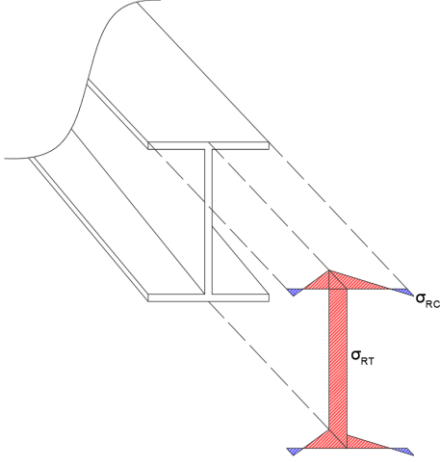
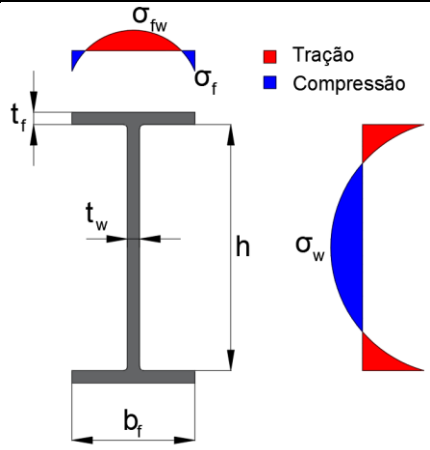
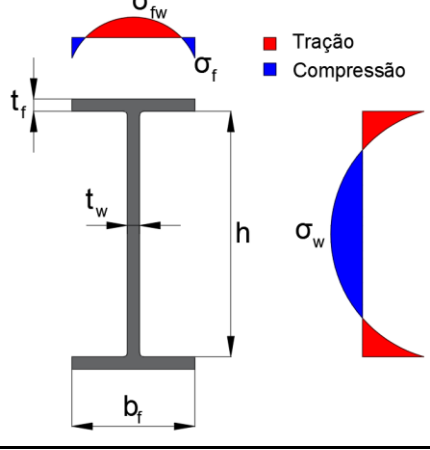
Figura 4.3 - Distribuição de tensões residuais em perfil I laminado



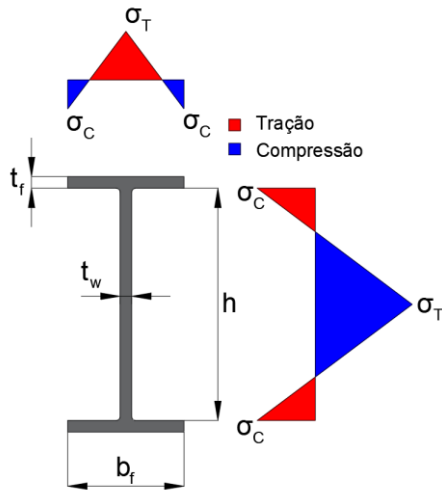
Fonte: Grilo (2018)

Diversos estudos realizados nas últimas décadas levaram à proposição de modelos de distribuição e intensidade de tensões residuais em perfis laminados; tais modelos são sumarizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Modelos de distribuição de tensões residuais em perfis laminados

Referência	Modelo de Distribuição	Intensidade das Tensões Residuais
Galambos e Ketter (1959)		$\sigma_{RC} = 0,3\sigma_y$ $\sigma_{RT} = \left(\frac{b_f t_f}{b_f t_f + t_w (H - 2t_f)} \right)$
Young (1972)		$\sigma_f = 165 \left(1 - \frac{A_w}{1,2A_f} \right)$ $\sigma_{fw} = -100 \left(0,7 + \frac{A_w}{A_f} \right)$ $\sigma_w = 100 \left(1,5 + \frac{A_w}{1,2A_f} \right)$
Young (1975)		$\sigma_f = 137,5 \left(2,2 - \frac{A}{A_f} \right)$ $\sigma_{fw} = 100 \left(-0,3 + \frac{A}{A_f} \right)$ $\sigma_w = 83,3 \left(1,5 + \frac{h t_w}{A_f} \right)$

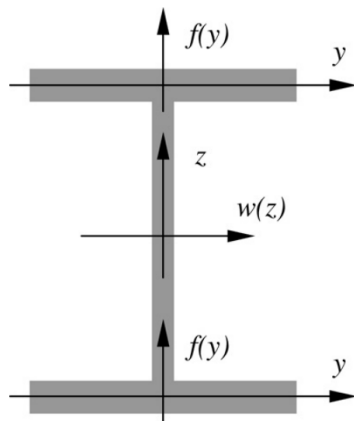
ECCS (1984)



$$h/b_f \leq 1,2 : |\sigma_{T,C}|_{max} = 0,5f_y$$

$$h/b_f > 1,2 : |\sigma_{T,C}|_{max} = 0,3f_y$$

$$\sigma_C < 0, \quad \sigma_T > 0$$

Szalai e Papp
(2005)

$$f(y) = c_f + a_f y^2$$

$$w(z) = c_w + a_w z^2$$

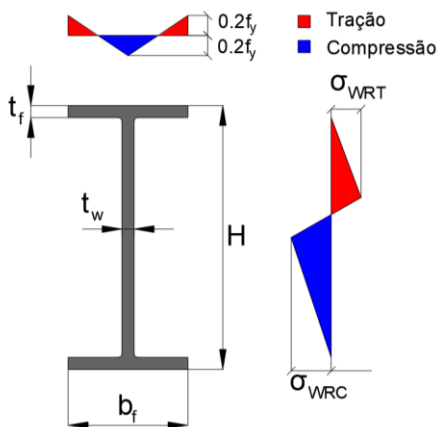
$f(y)$ e $w(z)$ são funções parabólicas que descrevem a distribuição das tensões residuais na mesa e na alma, respectivamente. c_f , a_f , c_w e a_w são coeficientes de calibração dependentes dos parâmetros da seção transversal

$$c_f = \alpha f_y \frac{b_f t_f (3b_f^2 + 4h^2)}{2b_f^3 t_f + 8b_f h^2 t_f + h^3 t_w}$$

$$a_f = -\alpha f_y \frac{20b_f^3 t_f + 48b_f h^2 t_f + 4h^3 t_w}{b_f^2 (2b_f^3 t_f + 8b_f h^2 t_f + h^3 t_w)}$$

$$c_w = -\alpha f_y \frac{b_f t_f (8b_f^3 t_f + 3b_f^2 h t_w + 2h^3 t_w)}{2h t_w (2b_f^3 t_f + 8b_f h^2 t_f + h^3 t_w)}$$

$$a_w = \alpha f_y \frac{2b_f t_f (8b_f^3 t_f + 9b_f^2 h t_w + 10h^3 t_w)}{h^3 t_w (2b_f^3 t_f + 8b_f h^2 t_f + h^3 t_w)}$$

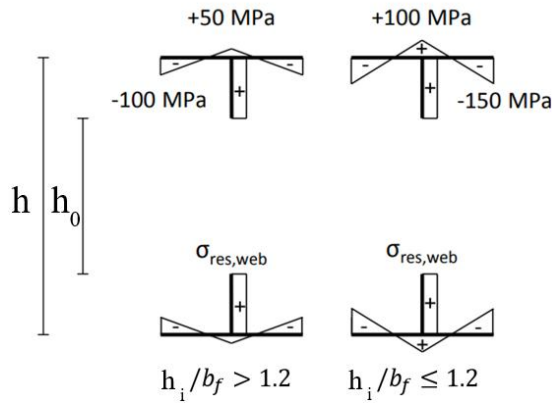
Spooremborg,
Snijder e
Hoenderkamp
(2011)

$$\sigma_{WRT} = \frac{7b_f t_f}{30(H - t_f)t_w} f_y$$

$$\sigma_{WRC} = -\frac{14b_f t_f}{30(H - t_f)t_w} f_y$$

O processo de fabricação de perfis celulares, por meio de corte térmico, gera tensões residuais devido ao resfriamento não uniforme nesta região. Sonck (2014) investigou experimentalmente a modificação das tensões residuais devido processo de fabricação dos alvéolos na alma (corte térmico e soldagem dos perfis). A aferição das tensões foi realizada antes e após a expansão e o modelo de distribuição proposto é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Modelo de distribuição de tensões residuais para vigas celulares



Obs.: a relação h_i/b_f é a altura pela largura referente ao perfil original. $\sigma_{res,web}$ se refere a máxima tensão residual de tração na alma do perfil alveolar.

Fonte: Adaptado de Sonck (2014)

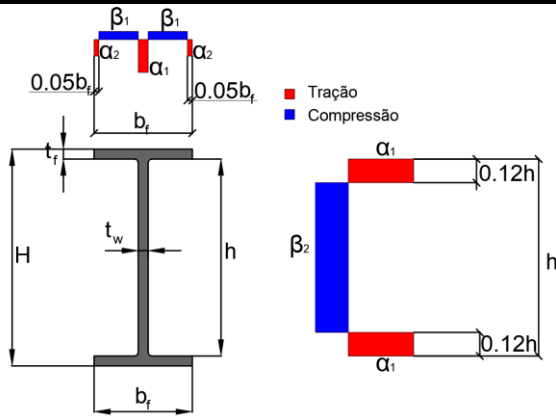
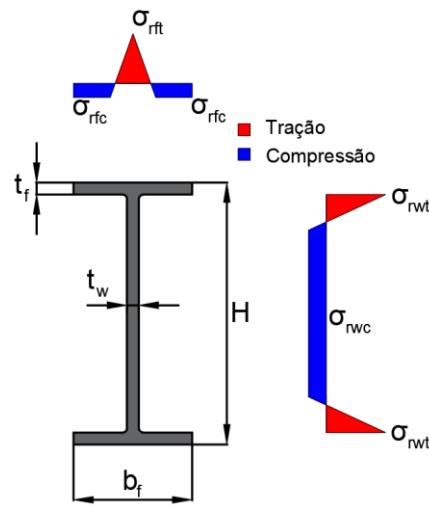
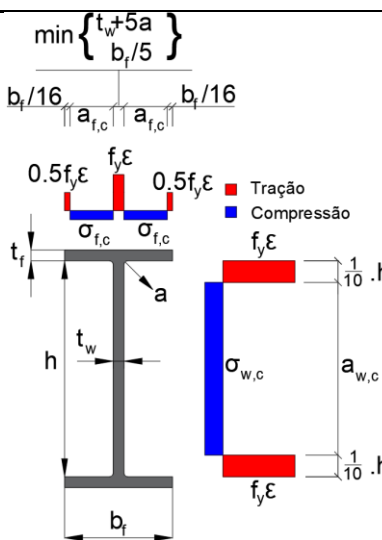
A $\sigma_{res,web}$ pode ser calculada conforme a equação (1).

$$\sigma_{res,web} = 50\text{MPa} \frac{b_f t_f}{(h - t_f - h_o) t_w} \quad (1)$$

4.1.2 Tensões residuais em perfis fabricados em aço de alta resistência

Ensaios experimentais evidenciaram que o AAR pode ser representado de forma mais precisa por curvas de resistência de caráter mais favorável (FENG *et al.*, 2018; TANKOVA *et al.* 2019; LE *et al.* 2020; YAN *et al.*, 2020; XIONG *et al.*, 2021; TANKOVA *et al.*, 2021). Esse resultado decorre da distribuição de tensões residuais em perfis soldados de aço de alta resistência (TANKOVA *et al.*, 2022). Neste contexto, destacam-se os estudos de Li, Li e Wang (2015), Le *et al.* (2020) e Schaper *et al.* (2022) cujos modelos propostos são sintetizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Modelos de distribuição de tensões residuais em perfis em aço de alta resistência

Referência	Modelo de Distribuição	Intensidade das Tensões Residuais
Li, Li e Wang (2015)		α e β são parâmetros dependentes da resistência ao escoamento do aço e das tensões residuais de tração e compressão, respectivamente. Onde: $\alpha = f_{rc}/f_y$ $\beta = f_{rt}/f_y$ f_y, f_{rc} e f_{rt} são os valores aferidos de resistência ao escoamento do aço, tensão residual de compressão e tração, respectivamente.
Le et al. (2020)		$\sigma_{rft} = \sigma_{rwt} = 0.7\sigma_y (\text{ou } 0.8f_y)$ $\sigma_{rfc} = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 \left(\frac{b_f}{t_f}\right)$ $\sigma_{rwc} = b_0 + b_1 t_w + b_2 t_w^2 + b_3 \left(\frac{b_w}{t_w}\right)$ $\sigma_{rfc}, \sigma_{rwc} \geq 20 \text{ MPa}$ a e b são parâmetros relativos às tensões residuais de compressão, em que: $a_0 = 140, a_1 = -16, a_2 = 0.4$ $a_3 = 820$ $b_0 = 115, b_1 = -10, b_2 = 0$ $b_3 = 2100$ Em que σ_{rft} e σ_{rwt} são picos de tensão residual de tração, ao passo que σ_{rfc} e σ_{rwc} são magnitudes de tensões residuais de compressão uniformes da mesa e alma, respectivamente.
Schaper et al. (2022)		$a_{f,c}$ e $a_{w,c}$ são dependentes da geometria da mesa e alma, respectivamente. $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ $\sigma_{F,C}$ e $\sigma_{W,C}$ são determinados a partir das condições de equilíbrio.

Fonte: Autor (2025)

4.2 Imperfeições Geométricas

As imperfeições geométricas estão presentes em elementos estruturais de aço e podem se originar no processo de fabricação ou por alguma força excêntrica. Consistem em ondulações presentes nos elementos de uma barra (alma e abas) e ao longo do seu comprimento e abrangem o empenamento da seção, torção, desvio do eixo global e ondulações locais (ALMEIDA, 2007). Estes fatores influenciam os modos de falha e o colapso de elementos estruturais de aço. As tensões residuais são diretamente relacionadas ao material (aço) e levam à redução de resistência e ductilidade. Em contrapartida, a falta de retinidade do perfil de aço devido às imperfeições geométricas (Figura 4.5) acentua o momento fletor gerado pela excentricidade do carregamento.

Figura 4.5 - Imperfeição geométrica em viga castelada

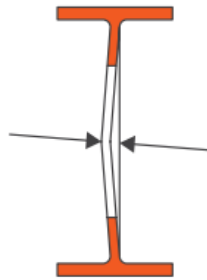


Fonte: Vieira (2015)

O valor da imperfeição inicial é atribuído com relação a um fator de curvatura inicial para compensar a não retinidade. Usualmente é atribuído um desvio de $L/1000$, sendo L o comprimento destravado de vigas com elevada esbelteza global. Autores como Ellobody (2012), Sonck (2014), Tankova et al. (2021) e Xiong et al. (2022) e a norma GB 50017 (2003) também recomendam o fator $L/1000$. Contudo, estes valores de imperfeições estão relacionados a modos de falha globais. Vieira (2015) aferiu imperfeições geométricas relacionadas ao montante de alma (Figura 4.6) e concluiu que a imperfeição inicial pode ser adotada igual a $h/100$ quando o controle de fabricação não é rigoroso; enquanto a tolerância é menor ($h/200$) quando o controle é efetivo. O ACB® (2020) recomenda que a imperfeição inicial no montante de alma (Figura 4.6) não deve ser inferior a 4mm quando $h < 600\text{mm}$ e maior ou igual a $h/100$ quando $h \geq 600$. Ferreira (2019) sintetizou os valores de imperfeição inicial conforme equação (2).

$$\text{IMP} = \begin{cases} \frac{h}{100}, \text{ se } \frac{L}{h} < 10 \\ \frac{L}{1000}, \text{ se } \frac{L}{h} \geq 10 \end{cases} \quad (2)$$

Figura 4.6 - Imperfeição geométrica no montante de alma



Fonte: Adaptado de ACB® (2020).

Portanto, na análise estrutural da viga celular devem ser consideradas a não linearidade física devido às tensões residuais no material, bem como a não linearidade geométrica oriunda das imperfeições geométricas. A implementação destas não linearidades afeta diretamente o comportamento e a capacidade resistente do elemento estrutural.

5. PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos normativos para verificação de vigas celulares biapoiadas.

5.1 Procedimentos Existentes

Como resultado do avanço das pesquisas sobre vigas celulares de aço, Europa e América do Norte publicaram normas de verificação. As versões mais recentes do AISC Design Guide 31 (FARES *et al.*, 2016), SCI P100 (WARD, 1990), SCI P355 (LAWSON; RICKS, 2011) e da BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024) foram aprimoradas. Tais normas fornecem critérios para a verificação da capacidade resistente de vigas celulares a diferentes modos de falha. O guia de projeto AISC Design Guide 31 (FARES *et al.*, 2016) é baseado na norma ANSI/AISC 360 (AISC, 2022), enquanto SCI P355 (LAWSON; RICKS, 2011) e BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024) são baseados nas normas europeias BS EN 1993-1-1 (ECS, 2022) e EN 1993-1-5 (ECS, 2024). Neste trabalho o termo EC3 (2024) é atribuído como forma de referência à norma BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024).

No presente estudo é avaliado o procedimento da norma BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024) para previsão de capacidade resistente de vigas celulares em aço comum e em aço de alta resistência, com aberturas pouco espaçadas. A nomenclatura e geometria do perfil (Figura 3.2) são baseadas no EC3 (2024). A norma europeia também apresenta limitações geométricas para diâmetro máximo h_0 , espaçamento mínimo s_0 e altura máxima h_t do “tê”, respectivamente, limitados a $h_0 \leq 0.8h$; $s_0 \geq 0.1h_0$, $h_t \geq t_f + 30\text{mm}$. Destaca-se que o EC3 (2024) permite que os montantes tenham largura reduzida, possibilitando a utilização de aberturas mais próximas entre si, ou seja, pouco espaçadas.

5.2 Capacidade resistente à FLT

A nova versão do EC3 (2024) apresenta o procedimento para verificação do momento resistente à FLT de vigas celulares de aço ($M_{b,Rd}$), conforme equação (3). Este procedimento é o mesmo apresentado pelo BS EN 1993-1-1 (ECS, 2022) de vigas de alma cheia, porém utiliza as propriedades da seção celular. A abordagem 2_T , baseada em Kerdal (1982), leva em conta a

contribuição dos “tês” superior e inferior para o cálculo do momento de inércia $I_{z,2T} = \frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{(h_w - h_0) t_w^3}{12}$, na constante de torção $J_{2T} = \frac{2 b_f t_f^3}{3} + \frac{(h_w - h_0) t_w^3}{3}$ e no empenamento $C_w = \frac{t_f b_f^3 (h_w + t_f)^2}{24}$. As equações (4)-(7) são utilizadas no cálculo da capacidade resistente à FLT, em que o valor do momento resistente característico (M_{Rk}) é avaliado no centro da abertura.

O procedimento parte do momento crítico M_{cr} , equação (8), depende da forma de aplicação do carregamento (efeitos estabilizante, neutro e desestabilizante) e do tipo de carregamento (concentrado ou distribuído, coeficientes C_1 e C_2). Quanto ao M_{Rk} , depende do módulo resistente plástico da seção e da resistência ao escoamento do aço, conforme equação (4). Por fim, o parâmetro que leva em conta a instabilidade lateral por torção, depende da curva de resistência, do fator de imperfeição e da esbeltez relativa à FLT. A sequência de verificação é dada a seguir:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} M_{Rk} \quad (3)$$

$$M_{Rk} = W_y f_y \quad (4)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{cr}}} \quad (6)$$

$$\phi_{LT} = 0.5 \left\{ 1 + f_M \left[\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_Z} \right)^2 \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_Z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \right\} \quad (7)$$

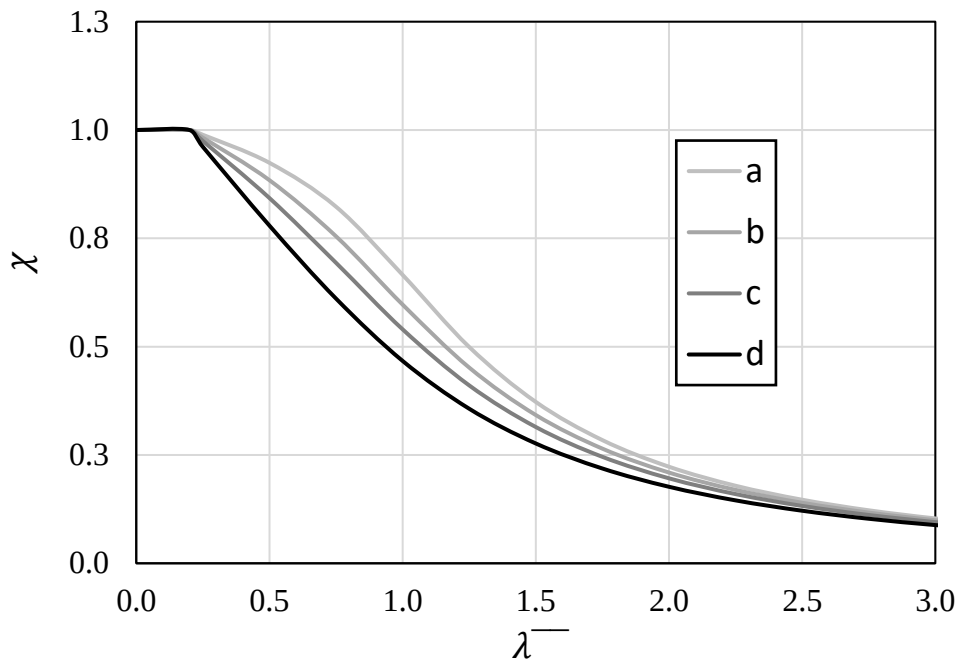
É importante ressaltar que existem três efeitos de aplicação do carregamento: estabilizante, neutro e desestabilizante. Para momento positivo, o primeiro considera a aplicação de carga na mesa tracionada, o segundo é aplicado coincidentemente no centro de cisalhamento. O mais crítico é o terceiro, o efeito desestabilizante, onde o carregamento é aplicado na mesa comprimida. Este estudo tem foco no efeito mais crítico. Neste sentido, o cálculo do momento crítico segue o que é proposto por Timoshenko e Gere (1961), conforme equação (8), associado a este efeito de carregamento, onde E é o módulo de elasticidade longitudinal, G é o módulo de elasticidade transversal; C_1 e C_2 são coeficientes dependentes do tipo de carregamento. Para carga uniformemente distribuída, estas constantes são iguais a

1.132 e 0.459, enquanto para carga concentrada aplicada no meio do vão recebem os valores de 1.365 e 0.553, respectivamente.

$$M_{cr} = \frac{C_1 \pi^2 E I_{z,2t}}{L^2} \left[\sqrt{\frac{C_w}{I_{z,2t}} + \frac{L^2 G J_{2t}}{\pi^2 E I_{z,2t}} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right] \quad (8)$$

χ_{LT} é o fator de redução para FLT, f_M é um fator: para momento uniforme, ou para considerações conservadoras, é adotado o valor 1.0. $\bar{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza relativa para FLT, de acordo com o EC3, se $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ a verificação para FLT pode ser desconsiderada e, $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$ pode ser assumido para o cálculo do momento crítico, se as condições de vínculo de garfo forem assumidas. O fator de imperfeição para FLT (α_{LT}) depende da curva de resistência selecionada a, b, c, d (Figura 5.1) e os valores correspondem a 0.21, 0.34, 0.49 e 0.72, respectivamente. A curva de resistência depende da relação h/b_f conforme apresentado pela (Tabela 5.1). A norma BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024) recomenda o uso da curva c para vigas duplamente simétricas fabricadas com perfis laminados a quente e, curva d para os demais casos. É importante ressaltar que as vigas celulares são elementos estruturais soldados, uma vez que é resultado do processo de fabricação para expansão do perfil.

Figura 5.1 – Curvas de resistência (EC3 buckling curves)



Fonte: Adaptado de BS EN 1993-1-1 (2022)

Tabela 5.1 – Seleção das curvas de resistência para casos gerais

Seção transversal	Limites	Curva
Perfis H ou I laminados	$h/b_f \leq 2.0$	<i>a</i>
	$h/b_f > 2.0$	<i>b</i>
Perfis I soldados	$h/b_f \leq 2.0$	<i>c</i>
	$h/b_f > 2.0$	<i>d</i>

Fonte: Adaptado de BS EN 1993-1-1 (2022)

A esbeltez relativa λ_z é calculada conforme a equação (9). Alternativamente, esta pode ser calculada considerando a classe da seção transversal, de forma que a equação (9) é aplicável às Classes 1, 2 e 3 e a equação (11) para a Classe 4, sendo L_{cr} o comprimento destravado, i o raio de giração do eixo relevante (propriedades da seção transversal) e λ_1 deve ser calculado de acordo com a equação (12).

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr,z}}} \quad (9)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \lambda_1} \quad (10)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\lambda_1} \quad (11)$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (12)$$

5.3 Capacidade resistente à FMA

O procedimento para verificação da capacidade resistente à FMA apresentado pela norma BS EN 1993-1-13 (ECS, 2024) é similar ao SCI P355 (FARES *et al.*, 2016). No entanto, enquanto a curva de resistência *a* é utilizada na primeira, a curva *c* é utilizada no segundo procedimento. Para vigas celulares com aberturas pouco espaçadas, que são o foco deste estudo, o comprimento de flambagem para o montante de alma é igual a $l_{wp} = 0.5(S_0^2 + h_0^2)^{0.5}$ e a esbeltez relativa para o montante de alma das vigas celulares sem enrijecedores é igual a $\bar{\lambda}_{wp} = \frac{1.75\sqrt{S_0^2 + h_0^2}}{t_w} \frac{1}{\lambda_1}$, em que $\bar{\lambda}_{wp} \leq \frac{2.4h_0}{t_w} \frac{1}{\lambda_1}$, λ_1 é a esbeltez de referência, conforme apresentado pela equação (12). Neste sentido, a capacidade resistente à FMA é definida como $N_{wp,Rd} =$

$\chi_{wp} S_0 t_w f_y$, em que χ_{wp} é o fator de redução para o montante de alma, que deve ser calculado com base na curva a e na esbeltez relativa para o montante de alma ($\bar{\lambda}_{wp}$). Ressalta-se que o procedimento apresentado no EC3 (2024) se refere a FMA devido ao cisalhamento no montante de alma, a norma não apresenta um procedimento específico levando em consideração a FMA devido aos esforços de compressão.

6. MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo serão apresentadas as validações dos modelos numéricos construídos no *software* ABAQUS. Para isso, foram incluídos detalhes do procedimento metodológico, como as propriedades geométricas e físicas, condições de contorno, tipo e tamanho de malha, calibração e comparação com resultados experimentais de referência.

6.1 Descrição das análises realizadas

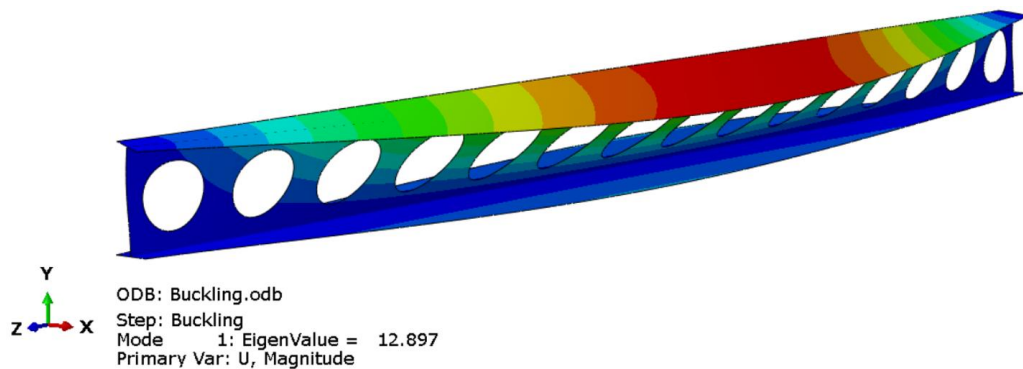
Para todos os modelos numéricos foram feitas duas análises: primeiramente, foi conduzida a análise de estabilidade elástica (*Buckling*) para determinação da carga crítica e da configuração deformada da estrutura e, posteriormente, a análise inelástica (*Post-buckling*) na qual foram inseridas as não linearidades físicas e geométricas.

A ausência de resultados experimentais de vigas celulares confeccionadas em aço de alta resistência dificultou a etapa de validação. Para contornar esta dificuldade, a validação foi dividida em partes. A primeira etapa foi a validação de modelos numéricos representativos de vigas celulares em aço comum. Para isso, foram utilizados os resultados experimentais de Warren (2001), Tsavdaridis e D’Mello (2011), Boissonnade *et al.* (2013) e Sonck (2014). Na validação de elementos em aço de alta resistência, foram utilizados os resultados experimentais de Xiong *et al.* (2021) e Xiong *et al.* (2022), ambos referentes às vigas de alma cheia. Em todas estas análises foi utilizado o *software* ABAQUS.

6.1.1 Análise de Estabilidade Elástica

O método de perturbação linear (*Buckle*) foi utilizado para avaliar a carga crítica de flambagem elástica. O modo de flambagem e a configuração deformada do elemento correspondem ao autovetor associado à carga crítica de flambagem elástica oriunda do respectivo autovalor positivo. A Figura 6.1 ilustra o primeiro autovetor no modo 1 de flambagem elástica, junto ao primeiro valor positivo apresentado pelo autovalor associado.

Figura 6.1 - Análise de estabilidade elástica (Buckling)



Fonte: Autor (2025)

Trata-se de uma análise de estabilidade elástica; portanto não são consideradas as imperfeições geométricas e físicas. Para tanto, a resposta para a carga crítica de flambagem elástica deve ser realizada através do produto da resposta do primeiro autovalor positivo à carga aplicada na estrutura. Esta carga crítica não é necessariamente relacionada com a carga última.

6.1.2 Análise Não Linear

A análise não linear compreende a estrutura na configuração deformada, e o diagrama “força vs deslocamento” não possui proporcionalidade. A matriz de rigidez altera-se com o aumento de carregamento; para tanto, a resposta para a solução dos produtos das matrizes é obtida pelo método iterativo-incremental. Ao contrário da análise linear, a não linearidade representa, mais adequadamente, o comportamento da estrutura, considerando as imperfeições físicas e geométricas do elemento estrutural. É fundamental que o comportamento não linear seja avaliado, sobretudo na presença de instabilidades.

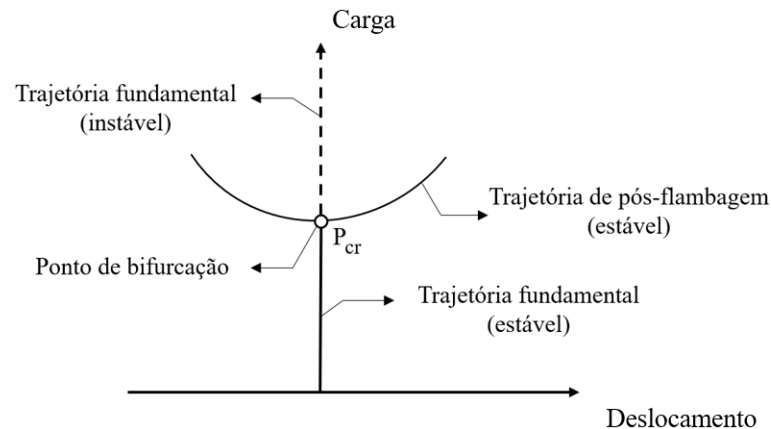
A configuração deformada da estrutura, extraída da análise linear, é utilizada como parâmetro inicial para a análise não linear, na qual são incorporadas as tensões residuais e imperfeições geométricas.

A carga crítica, e a configuração deformada do elemento estrutural correspondem à bifurcação do equilíbrio. O ponto de bifurcação (Figura 6.2) representa a carga crítica de flambagem elástica; posteriormente ocorre a instabilidade; nesta fase, a presença de qualquer perturbação provoca a falha no elemento. A bifurcação do equilíbrio é caracterizada quando existe (REIS; CAMOTIM, 2000):

- Uma trajetória de equilíbrio fundamental (linear ou não linear), que se inicia na origem do diagrama carga-deslocamento.

- Uma trajetória de equilíbrio pós-flambagem, que não passa pela origem do diagrama carga-deslocamento.
- Um ponto de bifurcação que corresponde à intersecção das duas trajetórias e no qual as configurações de equilíbrio da trajetória fundamental passam de estáveis às instáveis.

Figura 6.2 - Instabilidade bifurcacional



Fonte: Adaptado de Reis e Camotim (2000)

Esta instabilidade é caracterizada em elementos “perfeitos”, nos quais não há imperfeições geométricas (elemento perfeitamente retilíneo) ou físicas (modelo constitutivo do aço e presença de tensões residuais). Entretanto, devido às descontinuidades da resposta no ponto de bifurcação, o problema de pós-flambagem deve ser analisado com a introdução de uma imperfeição inicial na geometria “perfeita” da estrutura (CASTRO E SILVA, 2006).

Os problemas de pós-flambagem instáveis são solucionados no *software* ABAQUS, nestes problemas a rigidez da estrutura varia drasticamente entre cada passo de carga aplicado (DASSALT SYSTÈMES, 2012). Para tanto, o método “*Static Riks*” é utilizado para a resolução do problema não-linear geométrico dentro do *software* ABAQUS. Este, também é conhecido como algoritmo de *Riks* modificado. Assim, é possível descrever a curva carga-deslocamento da estrutura em análise, durante toda a trajetória de equilíbrio, obtendo assim a capacidade resistente do elemento.

6.2 Propriedades físicas

Os dados tensão-deformação para o modelo de plasticidade devem ser definidos em termos de tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira. Os valores nominais de tensão-deformação podem ser facilmente convertidos em valores reais (DASSALT SYSTÈMES, 2012). As equações (13)-(15) apresentam o procedimento para conversão.

$$\sigma_{\text{real}} = \sigma_{\text{nominal}}(1 + \varepsilon_{\text{nominal}}) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\text{nominal}} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\text{real}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nominal}}) \quad (15)$$

O comportamento do aço foi representado por diferentes tipos de diagrama tensão vs deformação, a depender da sua classe de resistência: o modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017) foi utilizado para os aços comuns, enquanto para a simulação dos aços de alta resistência foi adotado o modelo de Wang *et al.* (2021).

Yun e Gardner (2017) definem a relação tensão-deformação para aços comuns (Figura 6.3) a partir do módulo de Young $E = 210 \text{ GPa}$, as equações (16)-(20) definem a resistência ao escoamento f_y , deformação de escoamento ε_y , ponto de endurecimento de deformação ε_{sh} , parâmetro C_1 . Finalmente, $C_1 \varepsilon_u$ representa a deformação no ponto de interseção da curva no terceiro estágio, em que $f_{C_1 \varepsilon_u}$ é a tensão correspondente, a tensão e deformação última são ilustradas por f_u e ε_u , respectivamente.

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{sh} = \left(0.1 \frac{f_y}{f_u} \right) - 0,055 \quad (17)$$

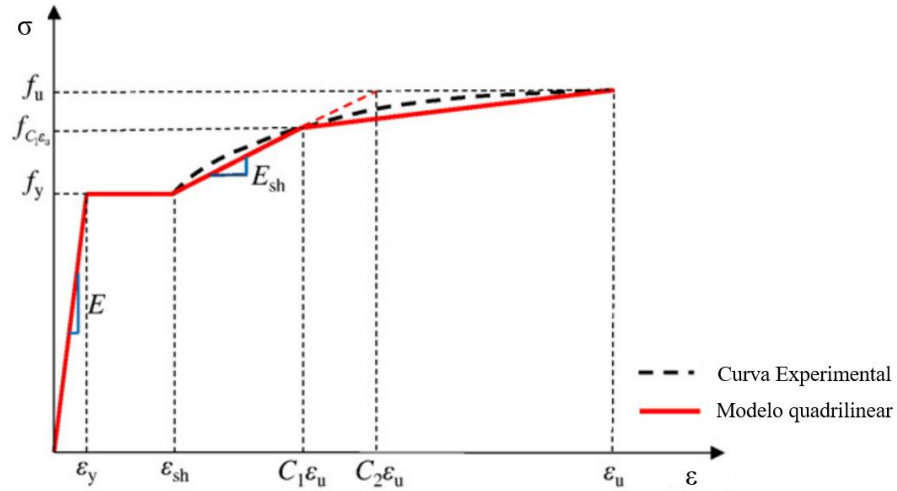
$$C_1 = [\varepsilon_{sh} + 0,25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})]/\varepsilon_u \quad (18)$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \quad (19)$$

$$f_u = 1,25 f_y \quad (20)$$

Segundo Ferreira (2021), o modelo quadrilinear de Yun e Gardner (2017) é o que melhor descreve o comportamento do aço em vigas celulares de aço comum. Portanto, este foi o modelo constitutivo adotado para a simulação de tais vigas.

Figura 6.3 - Modelo constitutivo de Yun e Gardner (2017) adotado para o aço comum



Fonte: Adaptado de Yun e Gardner (2017)

No caso do aço de alta resistência, foram realizados testes com os modelos descontínuo (Figura 6.4) e contínuo (Figura 6.5) de Wang *et al.* (2021) na descrição de seu comportamento. O modelo descontínuo proposto é representado pelas equações (21)-(25) nas quais constam os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade $E = 210 \text{ GPa}$, resistência ao escoamento f_y , deformação de escoamento ε_y , resistência última f_u , deformação última ε_u , deformação de endurecimento ε_h , ε_f e comprimento l_0 .

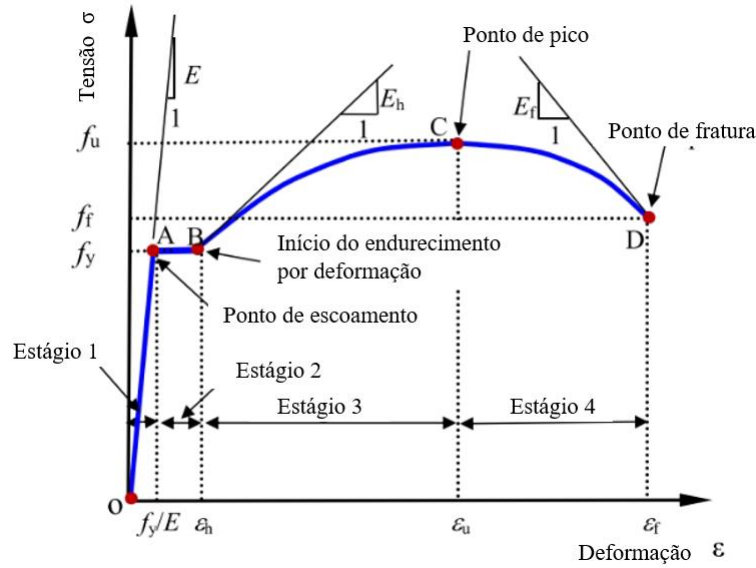
$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} \quad (21)$$

$$f_u = 205 + 0,85f_y \quad (22)$$

$$\varepsilon_u = (1 + f_y/315)^{-2.25} \quad (23)$$

$$\varepsilon_h = 0,032 - (0,01 * f_u/f_y) \quad (24)$$

$$\varepsilon_f = (1 + f_y/620)^{-2.25} \left(1 + \frac{50 - l_0}{280 - 0,1l_0} \right) \quad (25)$$

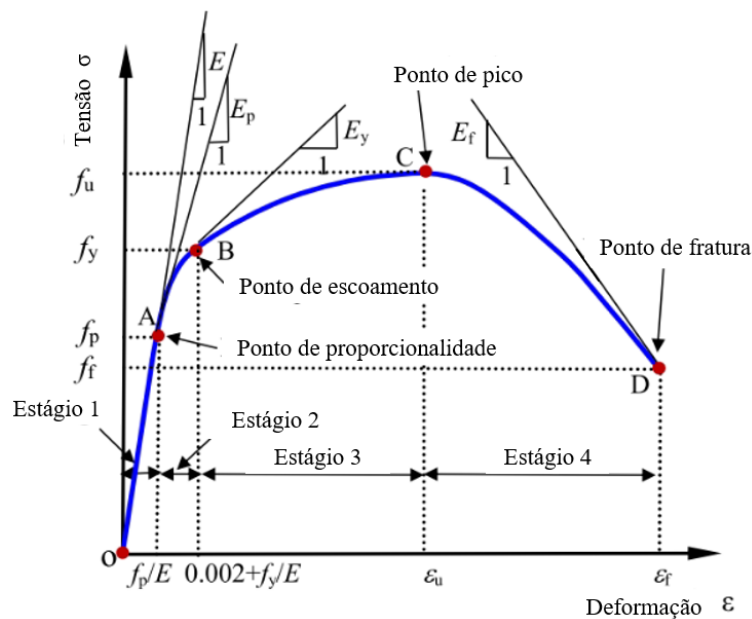
Figura 6.4 - Modelo I (descontínuo)

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021)

Por sua vez, modelo contínuo de Wang *et al.* (2021) é descrito pelas equações (22), (23), (25)-(27) e definidas pelos seguintes parâmetros: módulo de elasticidade $E = 210 \text{ GPa}$, resistência ao escoamento f_y , deformação de escoamento $0,002f_y/E$, resistência última f_u , deformação última ϵ_u , tensão e deformação proporcional f_p , f_p/E , limite inferior da tensão de fratura f_f e deformação de fratura ϵ_f .

$$f_f = 175 + 0,51f_y \quad (26)$$

$$f_p = 0,65f_y \quad (27)$$

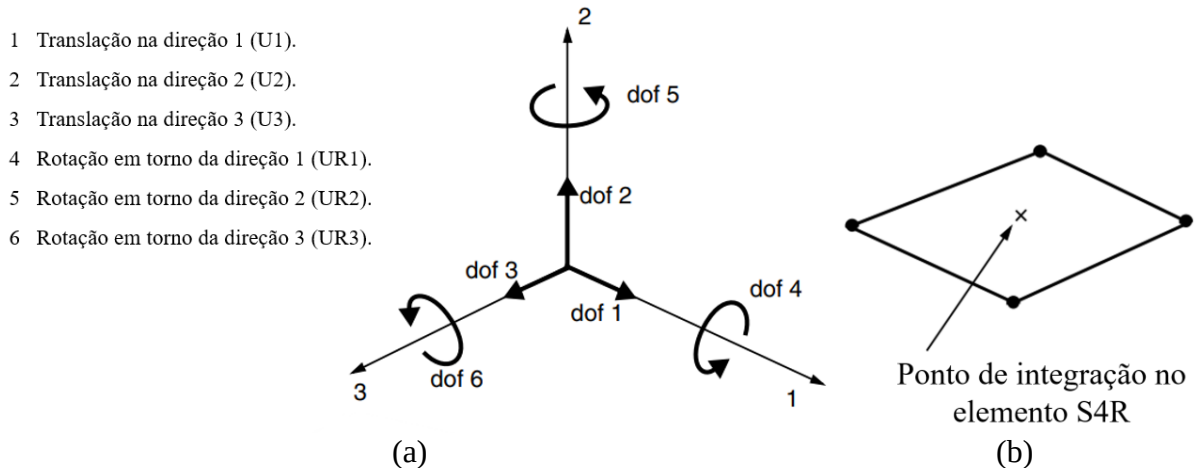
Figura 6.5 - Modelo II (contínuo)

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021)

6.3 Discretização do modelo numérico: tipos de elementos finitos e densidade de malha

O elemento de casca quadrilateral linear, de deformação finita da membrana e de integração reduzida (S4R) é robusto e de ampla aplicação (DASSALT SYSTÈMES, 2012). A integração reduzida permite diminuir o tempo de processamento e é adequada para discretizar elementos de aço, caracterizados por uma dimensão (espessura) relativamente menor que as demais. Os elementos de casca possuem seis graus de liberdade (dof - *degree of freedom*) por nó, sendo três rotações e três translações em cada eixo (Figura 6.6a).

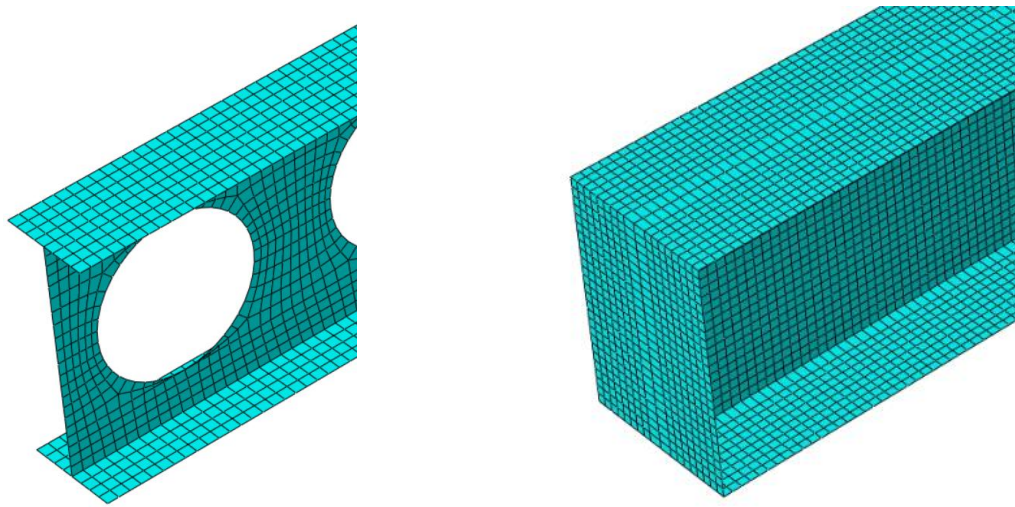
Figura 6.6 - Graus de liberdade e representação do elemento S4R



A representação numérica (1, 2 e 3) se refere ao sistema de coordenadas (X, Y e Z) respectivamente, sendo apresentadas as rotações e translações em cada eixo numericamente. Para tanto, os modelos numéricos foram discretizados com elementos de casca do tipo S4R (Figura 6.6b).

Tendo em vista que a adoção de 10mm (Figura 6.7) representou com acurácia a resposta dos modelos experimentais, e o tempo de processamento foi considerado aceitável e rápido (Tabela 6.1), não foi realizado estudo específico de densidade de malha.

Figura 6.7 - Discretização dos modelos numéricos



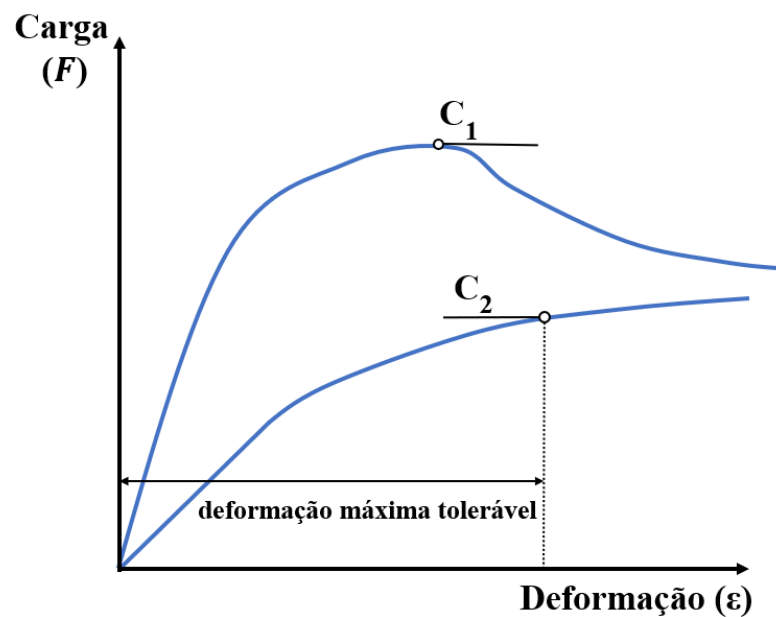
(a) Malha da viga celular

(b) Malha da viga de alma cheia

Fonte: Autor (2025)

A modelagem numérica avaliou as cargas máximas com base nos critérios C1 e C2 da norma EN 1993-1-14 (ECS, 2024). O critério C1 representa a carga máxima que o modelo numérico pode suportar, enquanto o critério C2 corresponde à carga na qual a deformação limite é atingida (Figura 6.8). A deformação máxima tolerável é determinada utilizando a equação (23) de Wang *et al.* (2021), aplicável a todos os tipos de aço.

Figura 6.8 – Critérios C1 e C2



Fonte: Adaptado de EN 1993-1-14 (2024)

Tabela 6.1 - Processamento inicial referente à malha de 10mm

Experimento	Autor	P_{EXP} (kN)	P_{NUM} (kN)	$\frac{P_{EXP}}{P_{NUM}}$	Tempo de processamento (min) ^c
CS2_L3	Sonck (2014) ^a	22.34	22.71	0.98	1.15
IPE 330	Boissonnade <i>et al.</i> (2013) ^a	176.90	183.59	0.96	7.12
B-270-2.5	Xiong <i>et al.</i> (2021) ^b	585.12	598.48	0.98	7.13
B350-0.5-1/3	Xiong <i>et al.</i> (2022) ^b	479	479.35	1.00	10.94

^aVigas celulares em aço comum.

^bVigas de alma cheia em aço de alta resistência.

^cO tempo de processamento se refere à soma da análise linear (análise de estabilidade elástica) junto à análise não linear (implementação da não linearidade física e geométrica). O processamento foi realizado em um computador com as seguintes especificações: Processador Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU @ 3.60GHz de 16 núcleos; 32Gb de memória RAM; Placa de vídeo dedicada NVIDIA GeForce GTX 1660.

Fonte: Autor (2025)

6.4 Condições de contorno e vinculações

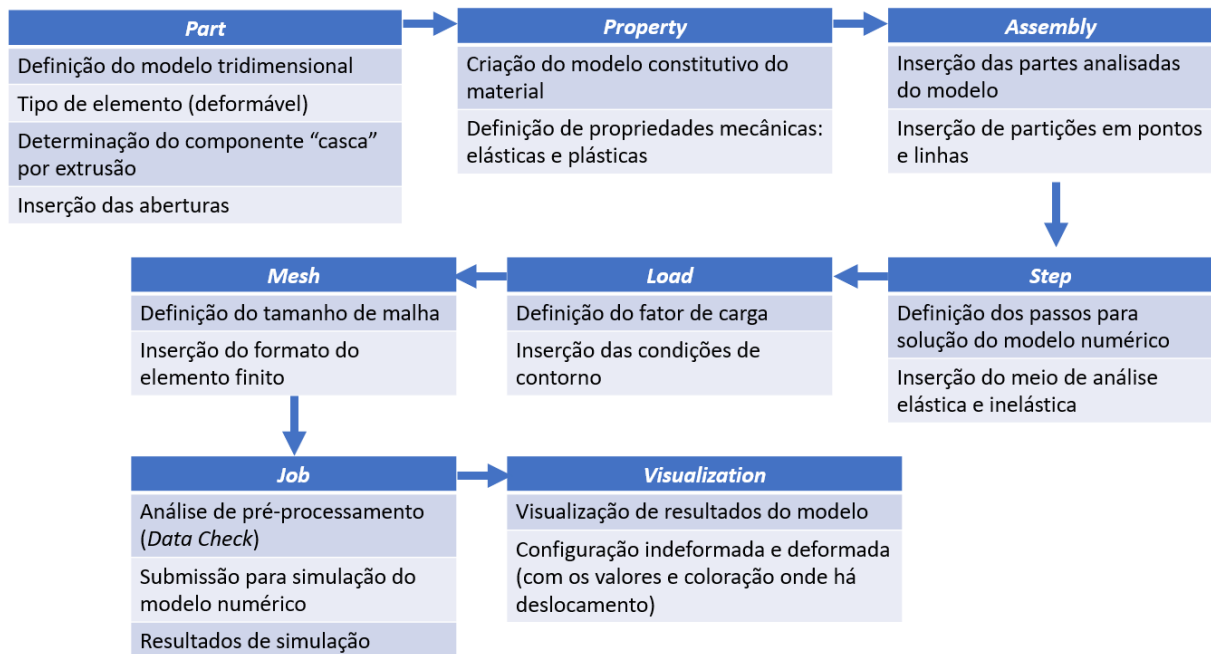
Tanto as vigas celulares quanto as vigas de alma cheia foram representadas como biapoiadas. Para obter as restrições necessárias, foram introduzidos vínculos de garfo nas extremidades de cada viga estrutural. Os modelos de referência foram submetidos a ensaios de flexão em três ou quatro pontos. Como consequência, foram aplicados carregamentos nodais nos modelos numéricos, por meio de incremento de força. O critério de parada assumido foi dependente do deslocamento máximo apresentado em cada ensaio experimental.

6.5 Validação e calibração do modelo numérico

A modelagem numérica incluiu a construção de modelos numéricos, a validação e a análise paramétrica. Nesta etapa foram utilizados 16 modelos de referência, sendo 7 vigas celulares em aço comum e 9 vigas de alma cheia em aço de alta resistência.

O *software* ABAQUS é dividido em módulos e, para cada módulo, há diferentes seções (Figura 6.9) para construção, definição e processamento do modelo. A construção do modelo numérico engloba: definição geométrica das partes, caracterização intrínseca do material empregado, inclusão do “*solver*”, representação das condições de contorno, definição da malha e tipo de elemento finito, e simulação. Os modelos numéricos foram validados conforme a ordem cronológica dos ensaios: primeiramente as vigas celulares em aço comum e, posteriormente, as vigas de alma cheia em aço de alta resistência.

Figura 6.9 - Fluxograma de módulos (ABAQUS)



Fonte: Autor (2025)

Para todos os modelos numéricos que sofreram colapso global, independentemente da classe de resistência do aço, foi adotada imperfeição geométrica de 1/1000 do comprimento destravado da viga (ELLOBODY, 2012; SONCK, 2014; KANG; MENG; LIN, 2020; XIONG *et al.*, 2021; XIONG *et al.*, 2022).

Nas vigas celulares foi utilizado o modelo de tensões residuais de Sonck (2014) e, nas vigas de alma cheia confeccionadas em aço de alta resistência foram assumidos os valores aferidos experimentalmente por Xiong *et al.* (2021) e Xiong *et al.* (2022).

O Quadro 6.2 apresenta a sequência de validação da modelagem numérica.

Quadro 6.2 - Sequência de validação dos modelos numéricos

Ordem	Referência	Modelo	Tipo de Viga
1°	Warren (2001)	1A	Celular
2°	Tsavdaridis e D' Mello (2011)	A1	
3°		B1	
4°	Boissonnade <i>et al.</i> (2013)	IPE330	
5°		HEA340	
6°	Sonck (2014)	CS2_L3	
7°		CS2_L4	
8°	Xiong <i>et al.</i> (2021)	B-270-2.5	Alma cheia
9°		B-270-3	
10°		B-270-3.5	
11°		B-270-4	
12°		B-450-4	
13°		B-450-4.5	
14°	Xiong <i>et al.</i> (2022)	B350-0.5-1/3	
15°		B450-1.00-1/3	
16°		B450-1.00-1/4	

Fonte: Autor (2025)

6.5.1 Modelagem numérica das vigas celulares em aço comum

A Tabela 6.2 apresenta detalhes das propriedades geométricas e dos materiais dos modelos de referência utilizados na validação dos modelos numéricos. Para garantir a representatividade da modelagem, foram selecionados resultados experimentais que abrangessem os diversos modos de falha observados em vigas celulares, incluindo MV, FMA e FLT.

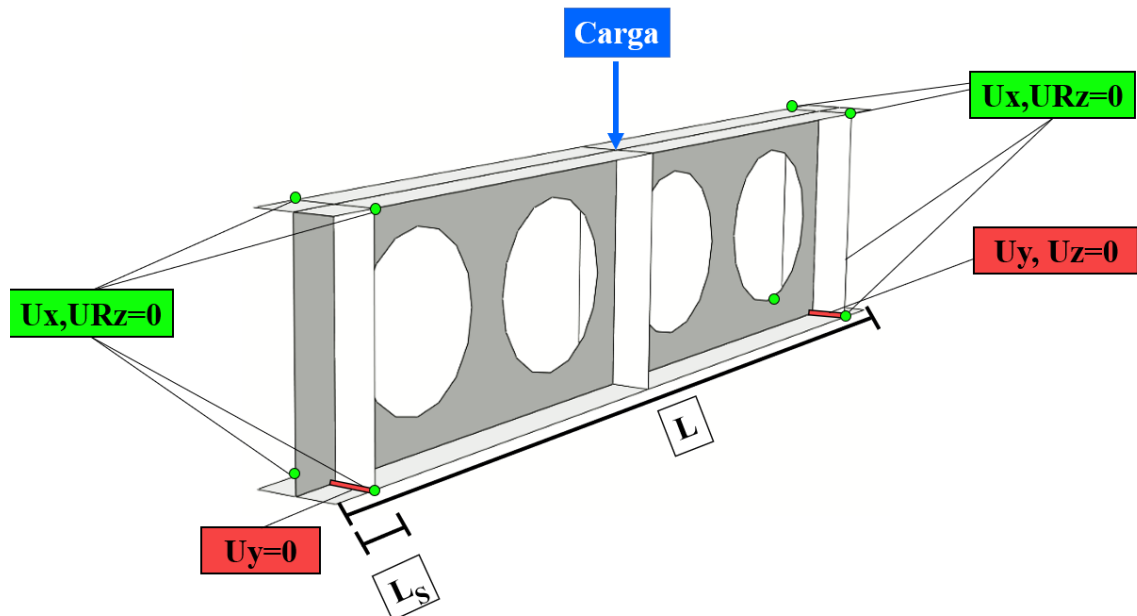
Tabela 6.2 – Características dos modelos numéricos de viga celular em aço comum

Modelo	h (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h_0 (mm)	S (mm)	LS (mm)	L (mm)	$f_{y,f}$ (MPa)	$f_{y,w}$ (MPa)	MF
1A ⁽¹⁾	289.8	133.4	7.8	5.8	200	300	100	3300	310	310	MV
B1 ⁽²⁾	449.8	152.4	10.9	7.6	315	378	100	1900	375.3	375.3	FMA
A1 ⁽²⁾	449.8	152.4	10.9	7.6	315	409.5	100	1900	359.7	359.7	FMA
CS2_L3 ⁽³⁾	220	83.1	7.3	5.5	142.8	210	-	3150	346	332	FLT
CS2_L4 ⁽³⁾	220	83.1	7.3	5.5	142.8	210	-	3990	346	332	FLT
HEA340 ⁽⁴⁾	470	297.4	16.0	10.35	345	515	1100	7500	480	552	FLT
IPE330 ⁽⁴⁾	460	161.55	10.75	7.75	345	395	1945	11000	373	481	FLT

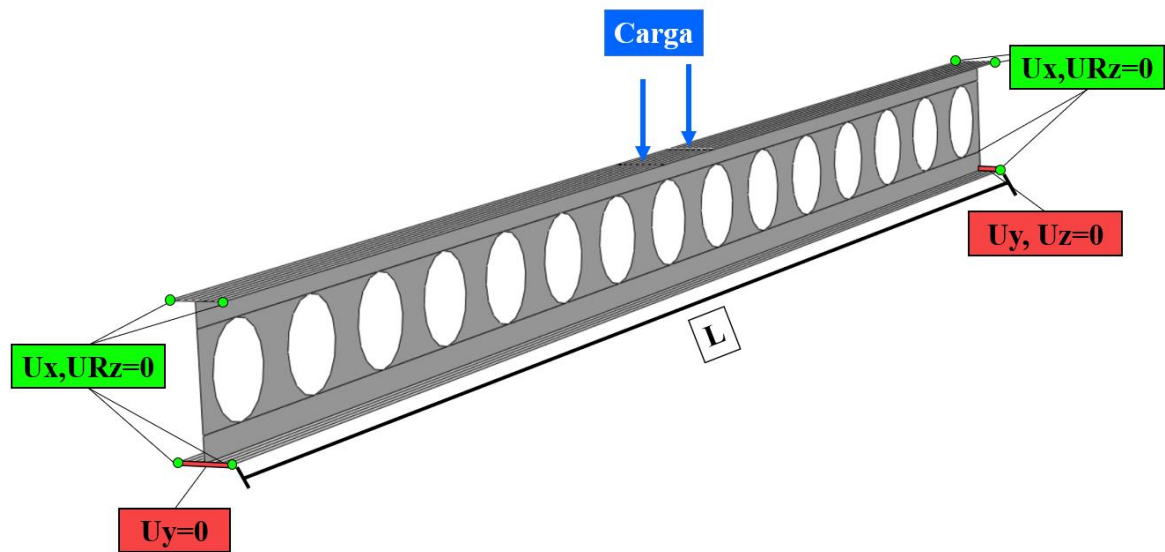
⁽¹⁾ Warren (2001)⁽²⁾ Tsavdaridis e D' Mello (2011)⁽³⁾ Sonck (2014)⁽⁴⁾ Boissonnade *et al.* (2013)

Fonte: Autor (2025)

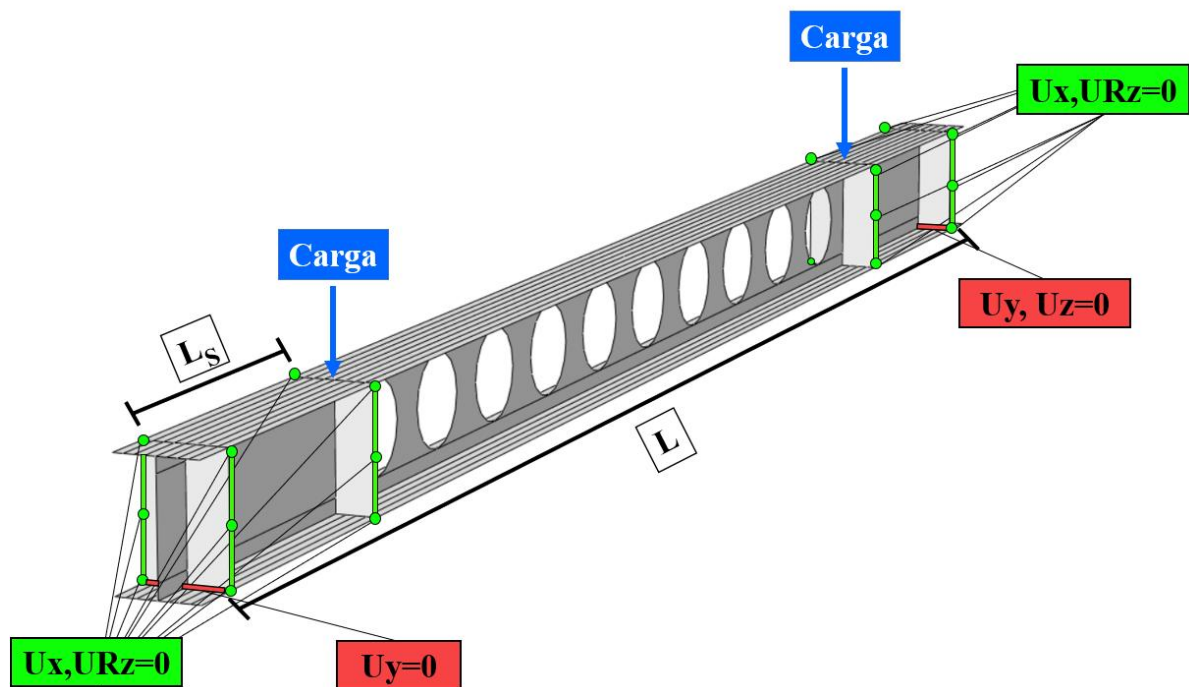
A Figura 6.10 ilustra as condições de contorno dos modelos numéricos de viga celular em aço comum.

Figura 6.10 – Condições de contorno das vigas celulares

(a) 1A (WARREN, 2001), A1, B1 (TSAVDARIDIS; D'MELLO, 2011)



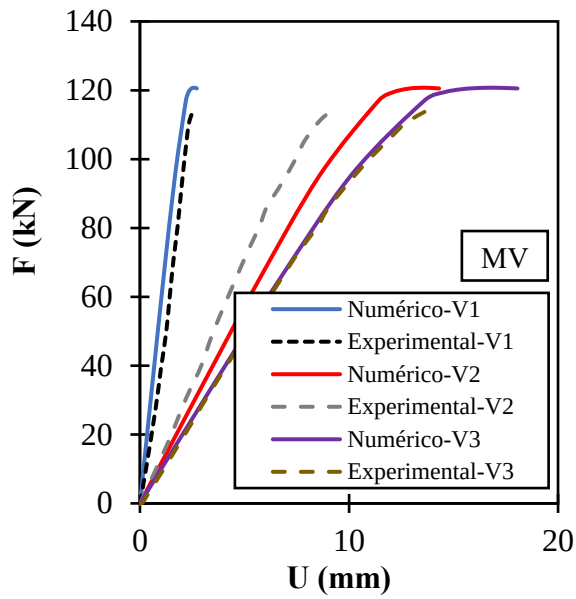
(b) CS2_L3, CS2_L4 (SONCK, 2014)

(c) IPE330, HEA340 (BOISSONNADE *et al.*, 2013)

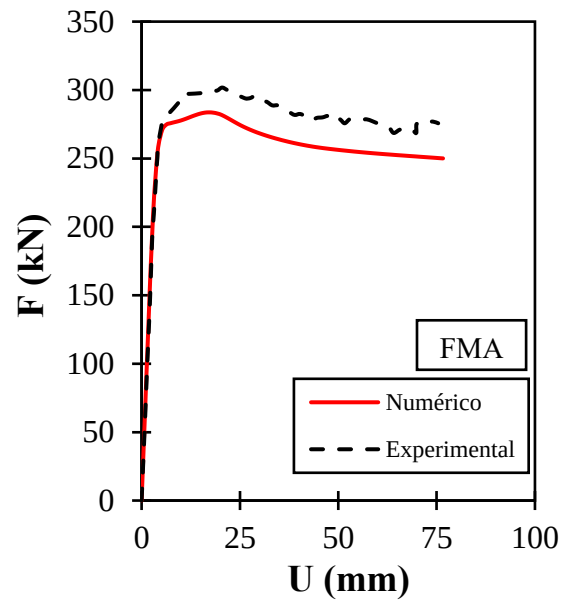
Fonte: Autor (2025)

As respostas de força (F) x deslocamento vertical (U) são apresentadas pela Figura 6.11. É possível observar que além da previsão de resposta dos gráficos apresentados indicarem uma boa precisão, os modelos numéricos apresentaram os mesmos modos de falha observados nos ensaios experimentais (Figura 6.12).

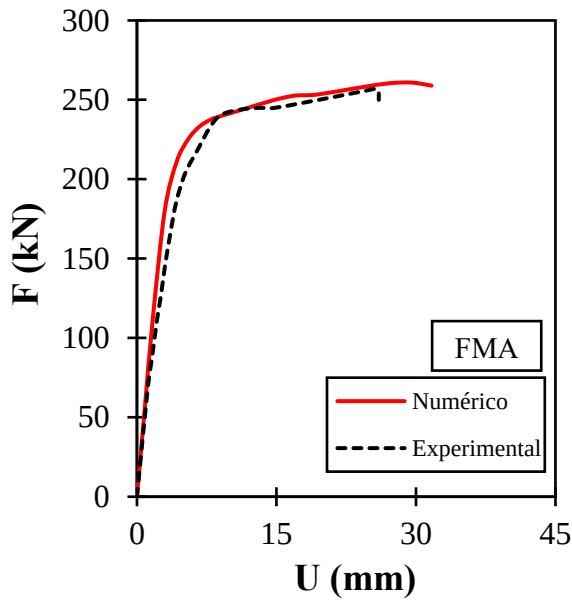
Figura 6.11 – Resposta carga x deslocamento dos modelos numéricos de vigas celulares



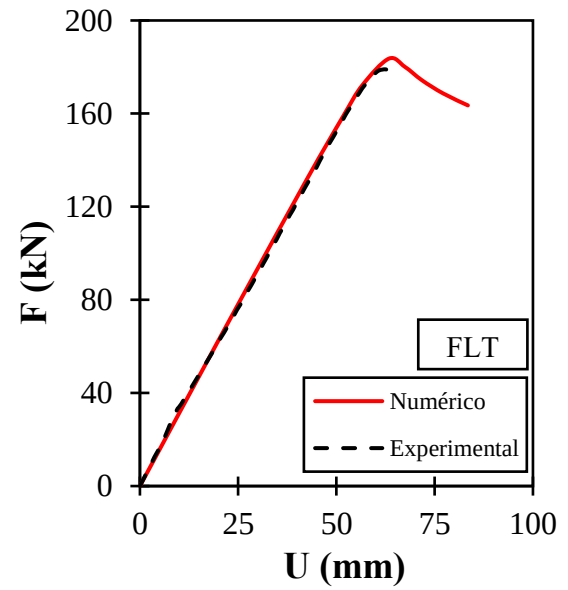
(a) 1A^(a)



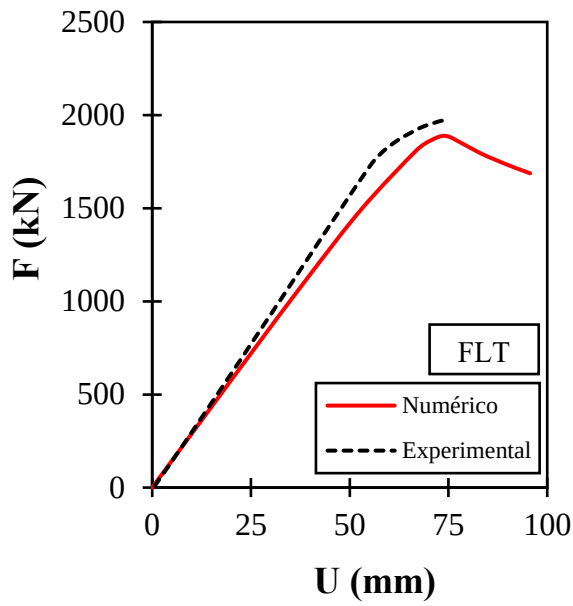
(b) A1



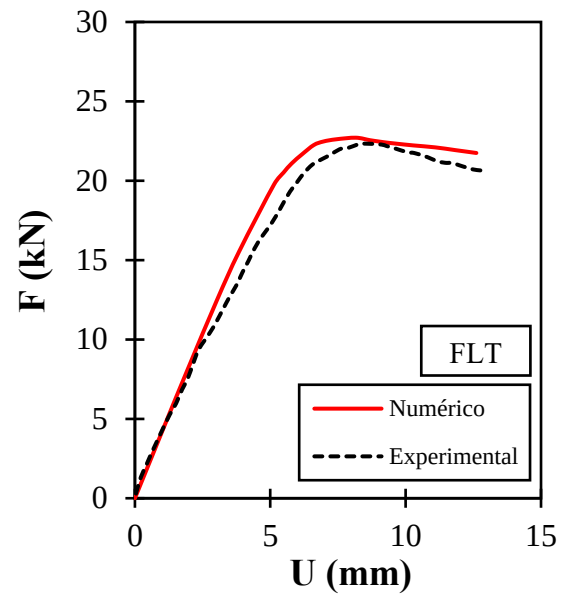
(c) B1



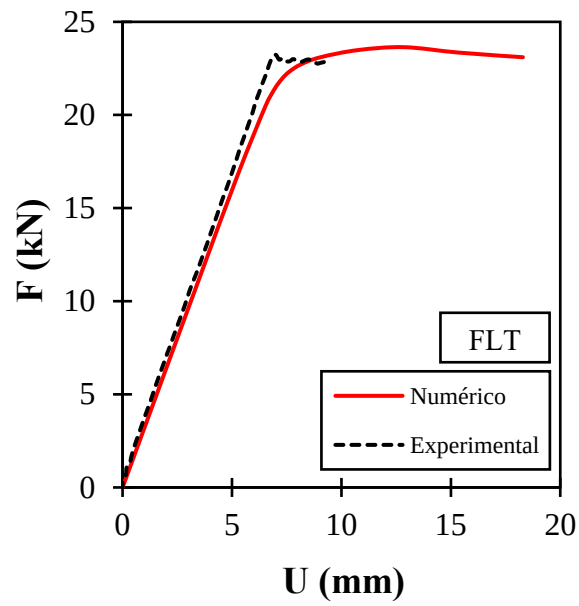
(d) IPE330



(e) HEA340



(f) CS2_L3

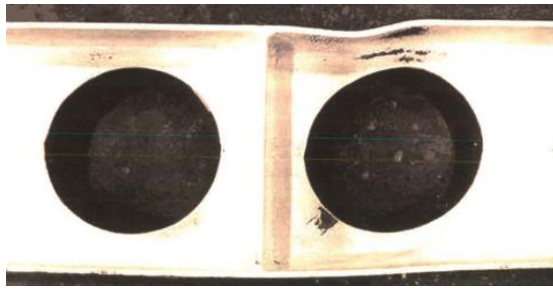


(g) CS2_L4

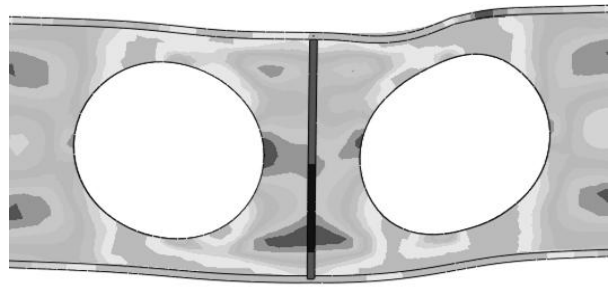
^(a) O autor (WARREN, 2001) mediu os deslocamentos em três locais ao longo da viga: no centro da primeira abertura (V1), da terceira (V2) e da quinta (V3).

Fonte: Autor (2025)

Figura 6.12 – Modos de falha das vigas celulares



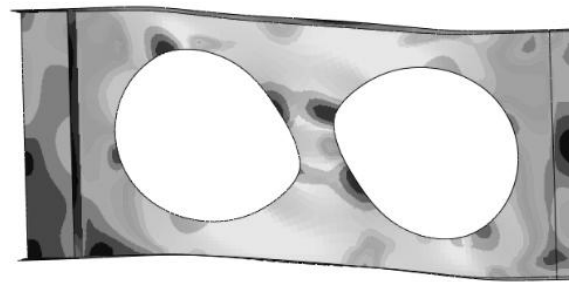
(a) Experimental, Warren (2001)



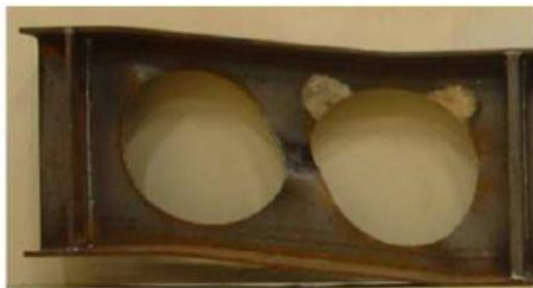
(b) Numérico



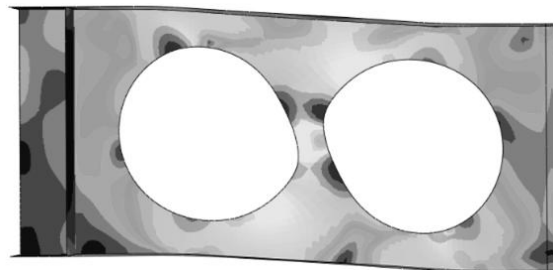
(c) Experimental, Tsavdaridis e D'Mello
(2011)



(d) Numérico



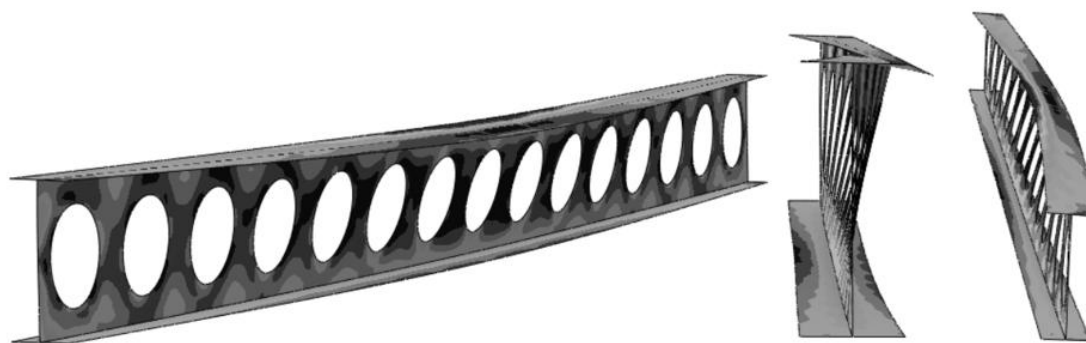
(e) Experimental, Tsavdaridis e D'Mello
(2011)



(f) Numérico



(g) Experimental, Sonck (2014)



(h) Numérico

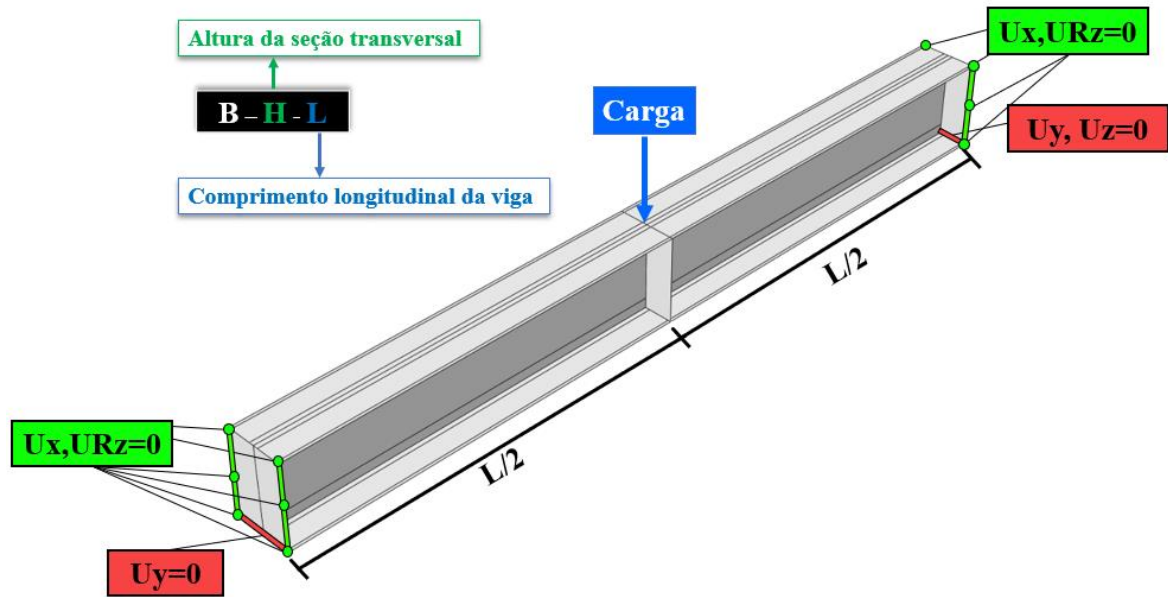
Fonte: Autor (2025)

O modelo numérico apresentou, de modo geral, excelente concordância com os experimentais. Tanto o trecho linear quanto o não linear mostraram boa representatividade (Figura 6.11). Observa-se ainda que alguns modelos apresentaram maior precisão (Figura 6.11-c,d,g) em relação a outros (Figura 6.11-b,e); contudo, a concordância é satisfatória em todos os casos. Ressalta-se, adicionalmente, que os modos de falha apresentados nos modelos numéricos foram compatíveis com aqueles observados nos ensaios experimentais (Figura 6.12).

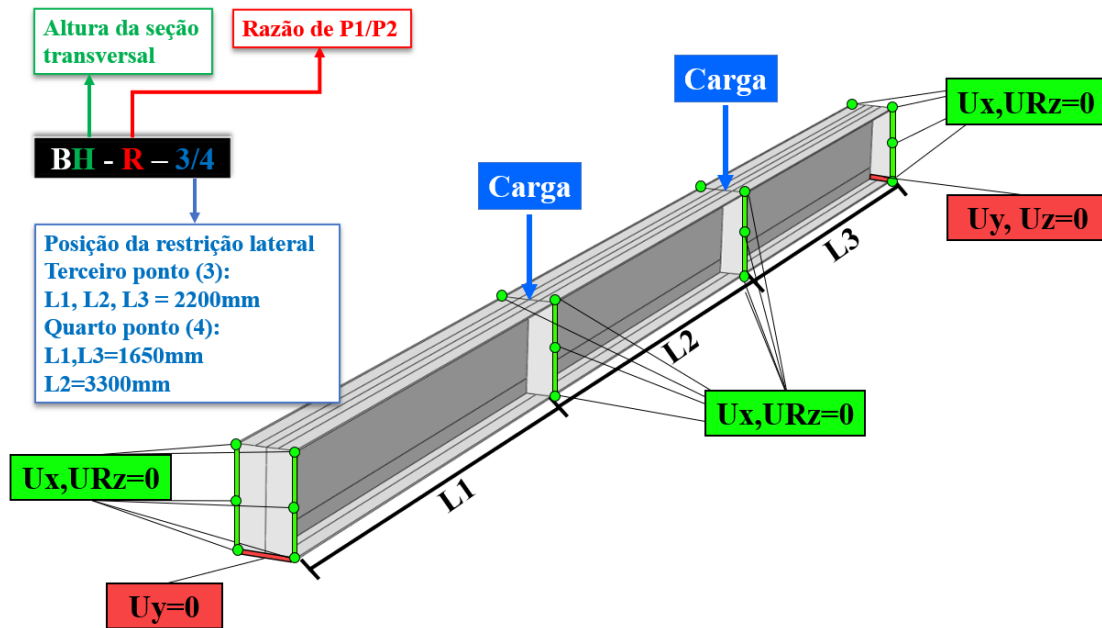
6.5.2 Modelagem numérica das vigas de alma cheia em aço de alta resistência

As vigas B-270 e B-470 ensaiadas por Xiong *et al.* (2021) apresentam as mesmas condições de contorno (Figura 6.13a), assim como propriedades mecânicas (Tabela 6.3), variando apenas o comprimento longitudinal e a altura da seção transversal do elemento estrutural. O modelo experimental do ensaio realizado é caracterizado por flexão a três pontos, sem restrição lateral. Por outro lado, os modelos experimentais de Xiong *et al.* (2022) são ilustrados pela (Figura 6.13b), caracterizando o ensaio experimental de flexão a quatro pontos, com restrições laterais no terceiro e quarto ponto. O modo de falha presente é caracterizado por FLT em todos os modelos, sendo utilizado o 14º modelo validado para ilustração (Figura 6.15).

Figura 6.13 - Condições de contorno das vigas de alma cheia em aço de alta resistência



(a) Modelo numérico do ensaio experimental realizado por Xiong *et al.*, (2021)



(b) Modelo numérico do ensaio experimental realizado por Xiong *et al.*, (2022)

Fonte: Autor (2025)

Tabela 6.3 - Características dos modelos numéricos de viga de alma cheia em aço de alta resistência

Modelo	h	b_f	t_f	t_w	L	$f_{y,f}$	$f_{y,w}$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)
B-270-2.5 ⁽¹⁾	270	180	12	10	2500	785.8	788
B-270-3 ⁽¹⁾	270	180	12	10	3000	785.8	788
B-270-3.5 ⁽¹⁾	270	180	12	10	3500	785.8	788
B-270-4 ⁽¹⁾	270	180	12	10	4000	785.8	788
B-450-4 ⁽¹⁾	450	180	12	10	4000	785.8	788
B-450-4.5 ⁽¹⁾	450	180	12	10	4500	785.8	788
B350-0.5-1/3 ⁽²⁾	350	200	14	10	6600	775.5	783.8
B450-1-1/3 ⁽²⁾	450	200	14	10	6600	775.5	783.8
B450-1-1/4 ⁽²⁾	450	200	14	10	6600	775.5	783.8

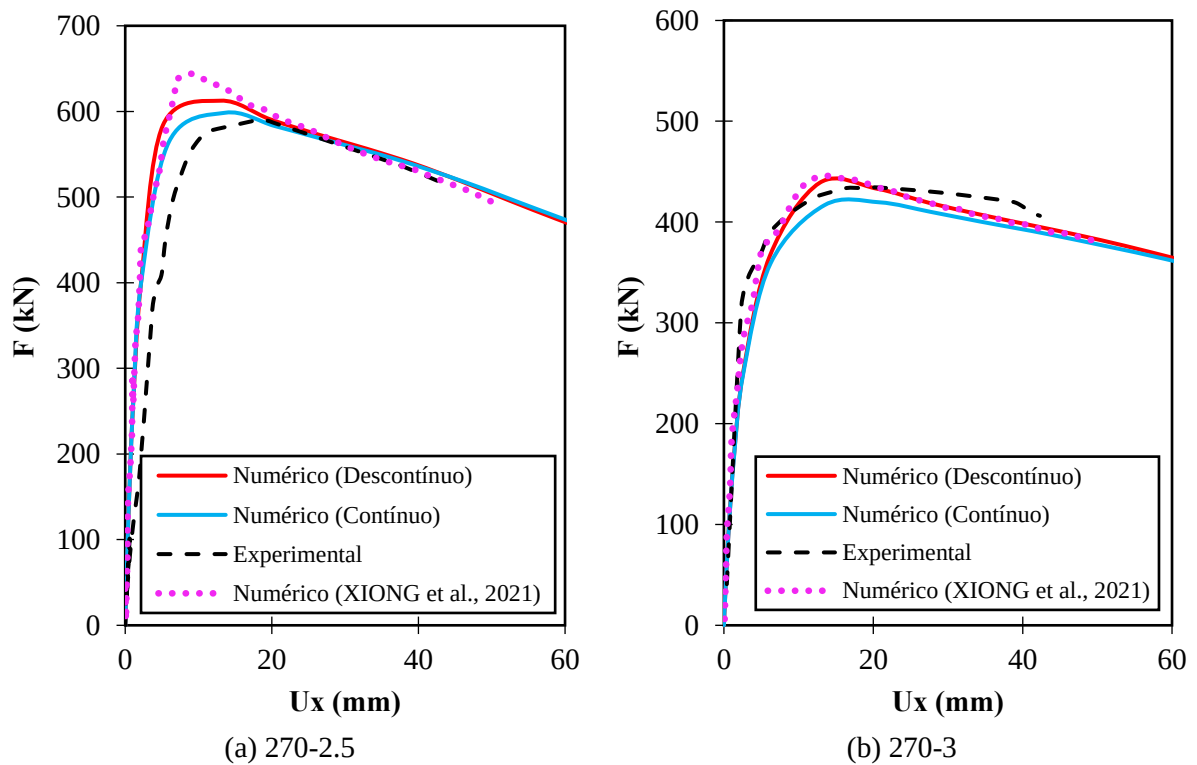
⁽¹⁾ Xiong *et al.* (2021)

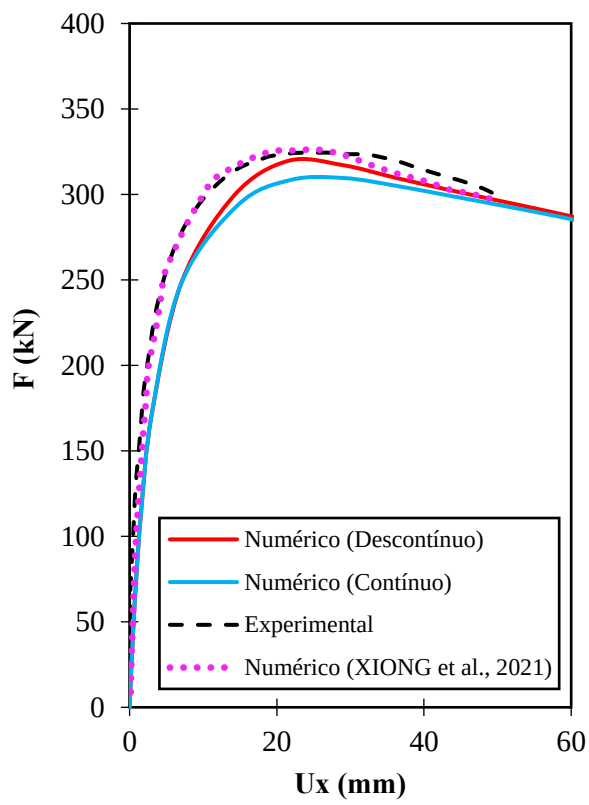
⁽²⁾ Xiong *et al.* (2022)

Fonte: Autor (2025)

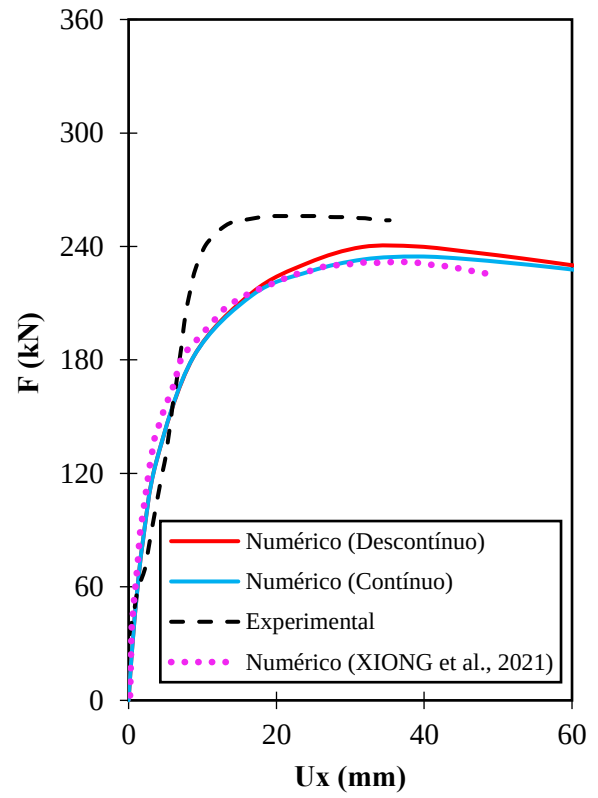
Os gráficos de calibração do modelo numérico em comparação com o modelo real são apresentados pela Figura 6.14.

Figura 6.14 – Resposta de carga x deslocamento dos modelos numéricos de vigas de alma cheia em aço de alta resistência

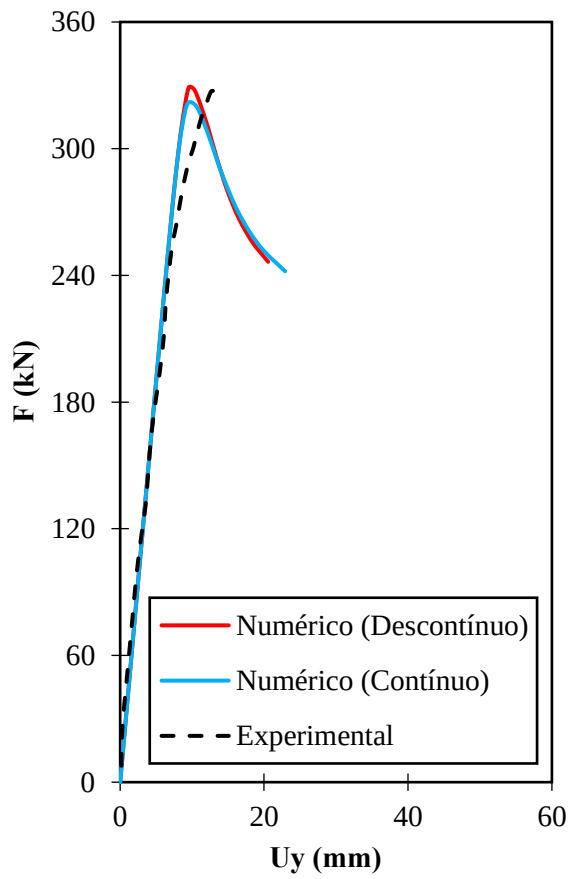




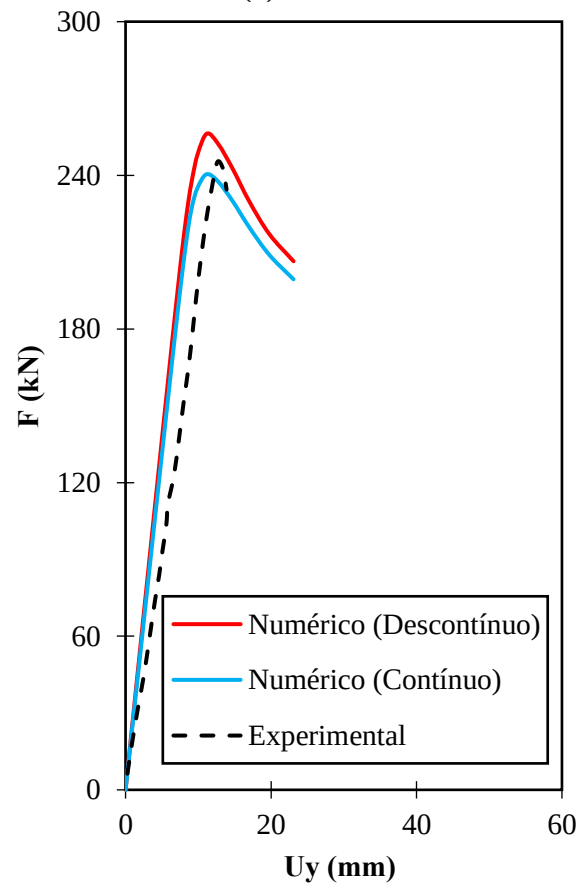
(c) 270-3.5



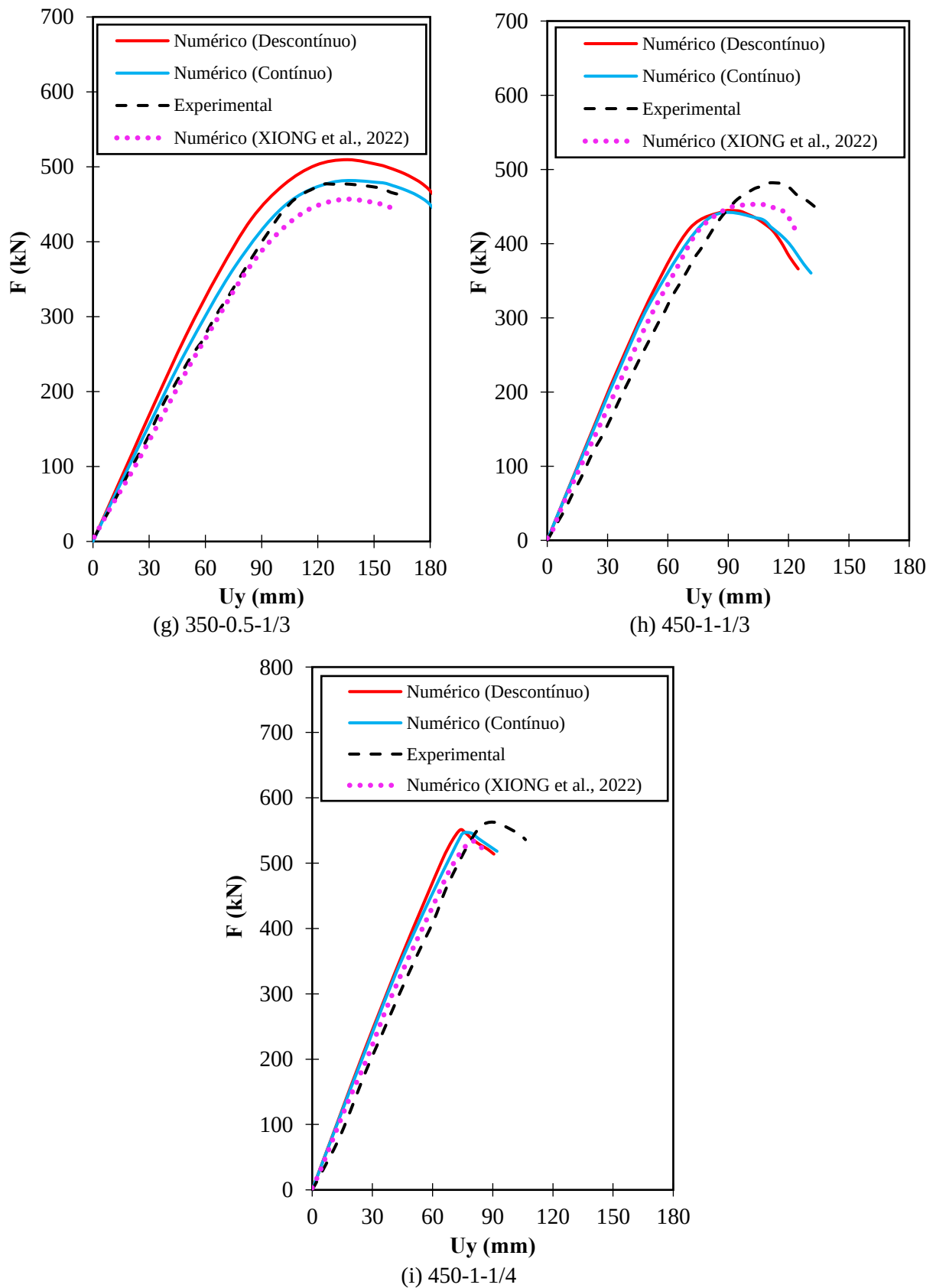
(d) 270-4



(e) 450-4



(f) 450-4.5



As legendas presentes no eixo das ordenadas (“ F ”) correspondem a força aplicada, enquanto no eixo das abscissas “ U_x ” representa o deslocamento em relação ao eixo x (horizontal) e “ U_y ” representa o deslocamento vertical (eixo y), no meio do vão.

Figura 6.15 - Modo de colapso experimental caracterizado por FLT (viga B350-0.5-1/3)



(a) Xiong *et al.* (2022)



(b) Numérico

Fonte: Autor (2025)

Os modelos foram calibrados utilizando os dois modelos constitutivos propostos por Wang *et al.* (2021) considerando aços de alta resistência. Entretanto, nota-se que o modelo descontínuo apresenta melhores resultados. Apesar de alguns modelos apresentarem melhor correlação (Figura 6.14 a-c, e-g) em comparação com os demais (Figura 6.14 d,h,i), a mesma resposta é observada nos resultados de validação dos autores (XIONG *et al.* 2021; XIONG *et al.* 2022). Neste sentido, a representatividade do modelo numérico é efetiva.

6.6 Síntese de resultados de validação

Os resultados de validação são apresentados pela Tabela 6.4. De acordo com os resultados apresentados, é possível confirmar que os modelos de vigas celulares constituídas em aço comum e vigas de alma cheia em aço de alta resistência foram calibrados. Com isso, é possível realizar o estudo paramétrico fundamentado nas validações apresentadas.

Tabela 6.4 - Síntese da validação do modelo numérico

Modelo	Tipo de viga ^{a,b}	Falha	P_{EXP} (kN)	P_{NUM} (kN) ^c	P_{EXP}/P_{NUM}
1A	Celular	MV	119.50	111.13	1.08
A1	Celular	FMA	288.70	283.67	1.02
B1	Celular	FMA	255.00	260.88	0.98
IPE330	Celular	FLT	176.90	183.78	0.96
HEA340	Celular	FLT	1977.00	1820.48	1.09
CS2_L3	Celular	FLT	22.34	22.65	0.99
CS2_L4	Celular	FLT	23.62	23.64	1.00
B-270-2.5	Alma cheia	FLT	585.12	612.52	0.96
B-270-3	Alma cheia	FLT	437.47	439.03	0.99
B-270-3.5	Alma cheia	FLT	321.94	316.66	1.02
B-270-4	Alma cheia	FLT	256.40	240.00	1.07
B-450-4	Alma cheia	FLT	318.90	328.84	0.97
B-450-4.5	Alma cheia	FLT	244.00	251.56	0.97
B350-0.5-1/3	Alma cheia	FLT	479.00	509.54	0.94
B450-1.00-1/3	Alma cheia	FLT	496.00	444.44	1.12
B450-1.00-1/4	Alma cheia	FLT	571.40	550.67	1.04
Média					1.013
Desvio padrão					0.053
CoV.					5.23%

^aAs vigas celulares foram calibradas considerando o modelo constitutivo para aços comuns, proposto por Yun e Gardner (2017), combinado ao modelo de distribuição de tensões residuais apresentado por Sonck (2014).

^bAs vigas de alma cheia foram calibradas utilizando o modelo constitutivo de Wang *et al.* (2021), para aços de alta resistência, junto à distribuição de tensões residuais apresentado por Xiong *et al.* (2021) e Xiong *et al.* (2022).

^cOs valores apresentados consideraram a capacidade resistente do modelo numérico de vigas de alma cheia com relação ao modelo descontínuo proposto por Wang *et al.* (2021).

Fonte: Autor (2025)

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes ao estudo paramétrico.

7.1 Estudo paramétrico 1 - Tensões residuais e imperfeições geométricas: Análise de sensibilidade

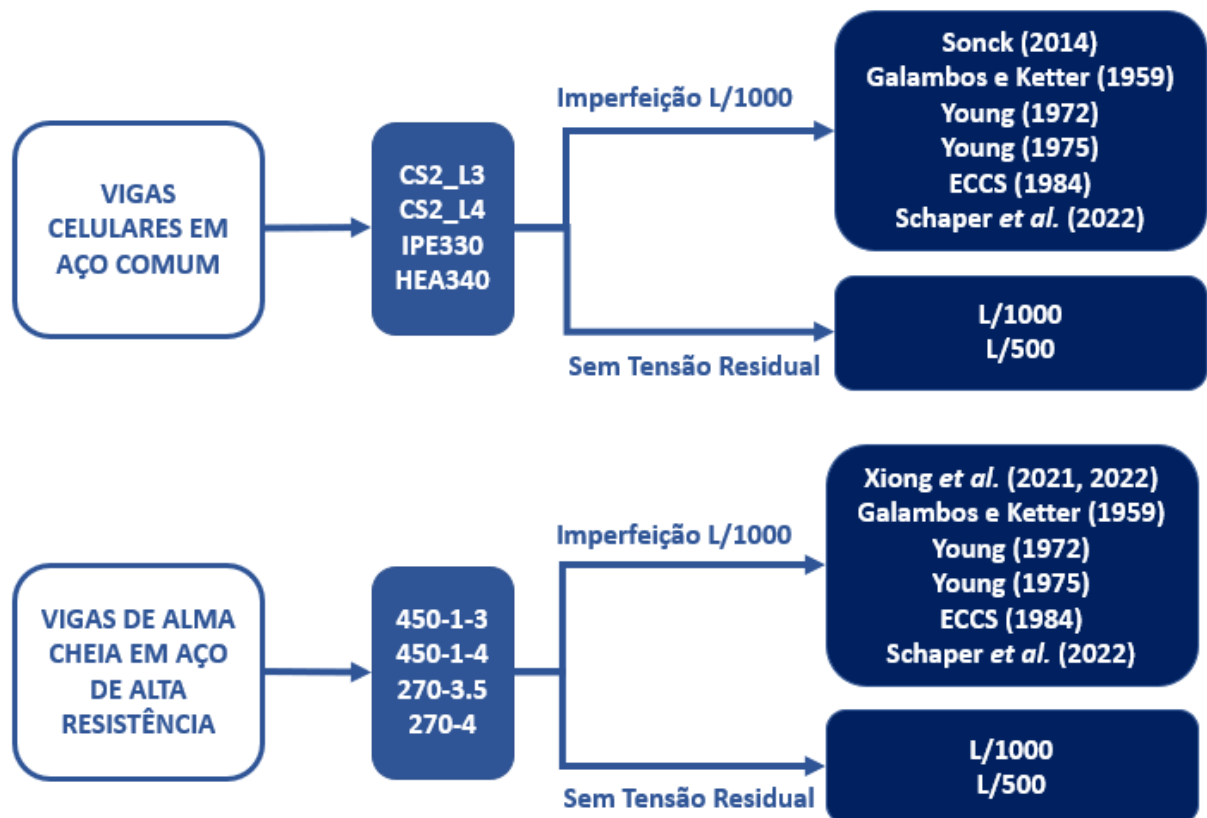
Nesta seção são apresentados os parâmetros adotados nos modelos numéricos para a análise de sensibilidade de tensões residuais (TR) e imperfeições geométricas. Como visto anteriormente, a distribuição de tensões residuais em vigas celulares é difícil de se obter devido ao processo de manufatura do perfil. Neste sentido, autores como Sonck *et al.* (2012) adotaram uma abordagem simplificada para implementar as tensões residuais nos modelos numéricos. Tendo em vista que a tensão residual de compressão nas mesas é a mais influente no comportamento à FLT, os autores adotaram o modelo de distribuição apresentado pelo ECCS (1984), assumindo o valor de zero nas almas. Do mesmo modo, a adoção de imperfeições geométricas equivalentes é outra estratégia de simplificação utilizada para cobrir ambas as imperfeições físicas e geométricas. Valores elevados de imperfeição geométrica inicial foram previamente utilizados nos estudos de Panedpojaman *et al.* (2016) e Boissonnade *et al.* (2024).

A análise de sensibilidade teve como objetivo avaliar a resposta dos modelos em elementos finitos de vigas celulares frente às variações nas imperfeições geométricas e tensões residuais, abrangendo tanto aços convencionais quanto aços de alta resistência. Todos os modelos foram avaliados considerando apenas imperfeições geométricas iniciais e diversos padrões de distribuição de tensões residuais.

Tensões Residuais e Imperfeições Geométricas têm grande influência na estabilidade global e devem ser consideradas na modelagem numérica. No entanto, até o presente momento não há estudos referentes às tensões residuais em vigas celulares em aço de alta resistência. O estudo de Sonck (2014) é o único que apresenta um modelo de distribuição de tensões residuais para vigas celulares conformadas, porém apenas para perfis laminados em aço comum. Usualmente os perfis em aço de alta resistência são soldados; isto afeta diretamente a distribuição de tensões residuais nos perfis. Neste contexto, este é o primeiro estudo que avalia os efeitos do modelo de distribuição das tensões residuais em vigas celulares em aço de alta resistência.

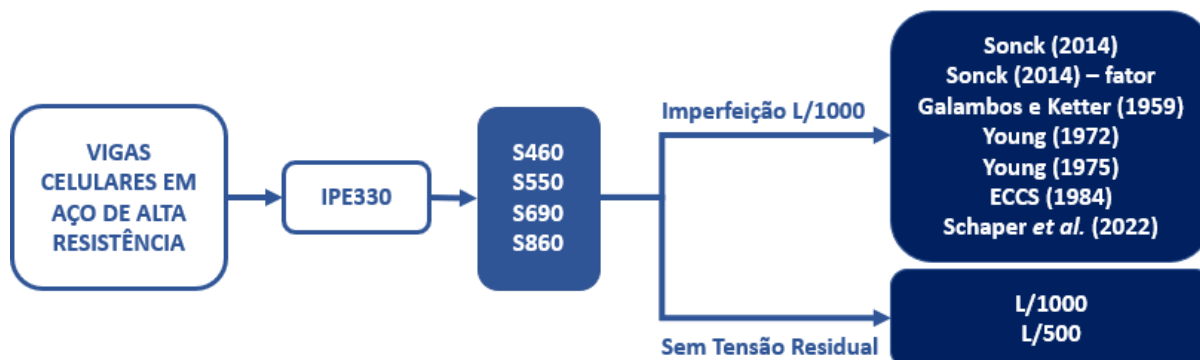
A fim de avaliar a influência destes parâmetros no comportamento à FLT de vigas celulares e vigas de alma cheia em aço de alta resistência, foram investigados dois tipos de imperfeições geométricas iniciais e seis modelos de distribuição de tensões residuais (Figura 7.1). Utilizando quatro diferentes valores de resistência ao escoamento do aço, a mesma estratégia foi utilizada para comparar as imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais no comportamento global de vigas celulares em aço de alta resistência (Figura 7.2). Esta análise numérica contribuiu para a seleção do modelo mais adequado e magnitude de tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais para estudos futuros.

Figura 7.1 – Fluxograma para análise de sensibilidade de vigas celulares em aço comum e vigas de alma cheia em aço de alta resistência



Fonte: Autor (2025)

Figura 7.2 – Fluxograma para análise de sensibilidade de vigas celulares em aço de alta resistência



Fonte: Autor (2025)

Neste estudo paramétrico foram utilizados os modelos numéricos validados no Capítulo de Modelagem Numérica e cuja falha se deu por FLT (BOISSONNADE *et al.*, 2013; SONCK, 2014) e vigas de alma cheia em aço de alta resistência (XIONG *et al.*, 2021; XIONG *et al.*, 2022).

Neste contexto, o estudo paramétrico abrange três estratégias de modelagem numérica para vigas celulares e com alma cheia. A primeira abordagem adota o padrão de tensões residuais proposto por Sonck (2014) para vigas celulares e os valores aferidos por Xiong *et al.* (2021, 2022) para vigas com alma cheia em aço de alta resistência. A segunda considera uma distribuição de tensões residuais para vigas com alma cheia, apresentada por Galambos e Ketter (1959), Young (1972), Young (1975), e ECCS (1984), sendo que ambas as análises incorporam uma imperfeição geométrica inicial com amplitude de $L/1000$. Por fim, uma imperfeição inicial maior de $L/500$ e outra de $L/1000$ são introduzidas para representar as tensões residuais na modelagem numérica.

A razão entre a força última e da modelagem numérica foi utilizada para avaliar a sensibilidade dos modelos numéricos. Parâmetros estatísticos como média (μ), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CoV) foram considerados na análise não linear.

7.1.1 Sensibilidade de vigas celulares em aço comum

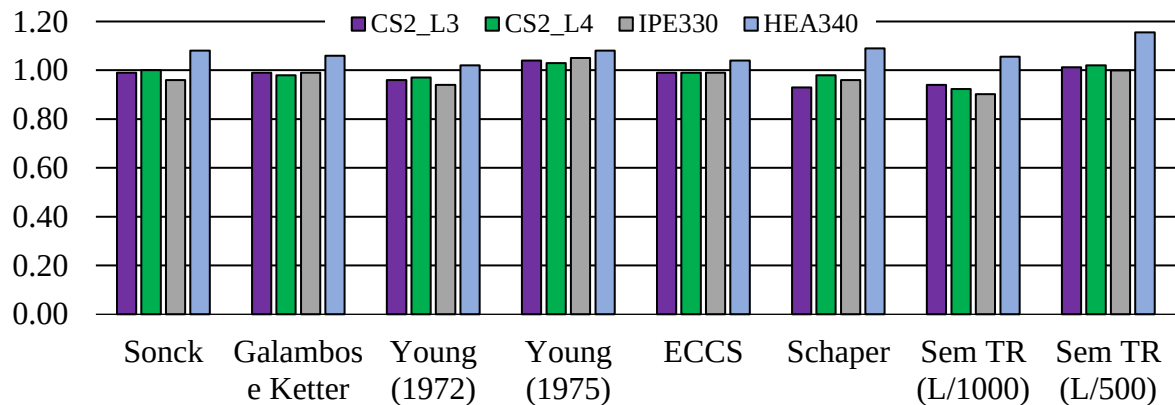
Os resultados da análise de sensibilidade dos modelos numéricos de viga celular em aço comum são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Influência do padrão de tensões residuais na capacidade resistente de vigas celulares

Teste	P_{EXP} (kN)	Sonck	Galambos e Ketter	Young (1972)	Young (1975)	ECCS	Schaper	Sem TR (L/1000)	Sem TR (L/500)
CS2_L3	22.34	0.99	0.99	0.96	1.04	0.99	0.93	0.94	1.01
CS2_L4	23.62	1.00	0.98	0.97	1.03	0.99	0.98	0.92	1.02
IPE330	176.9	0.96	0.99	0.94	1.05	0.99	0.96	0.90	1.00
HEA340	1977	1.08	1.06	1.02	1.08	1.04	1.09	1.06	1.16
	μ	1.01	1.01	0.97	1.05	1.00	0.99	0.96	1.05
	σ	0.051	0.037	0.034	0.022	0.025	0.070	0.069	0.073
	CoV	5.09%	3.68%	3.50%	2.06%	2.49%	7.05%	7.21%	6.97%

Fonte: Autor (2025)

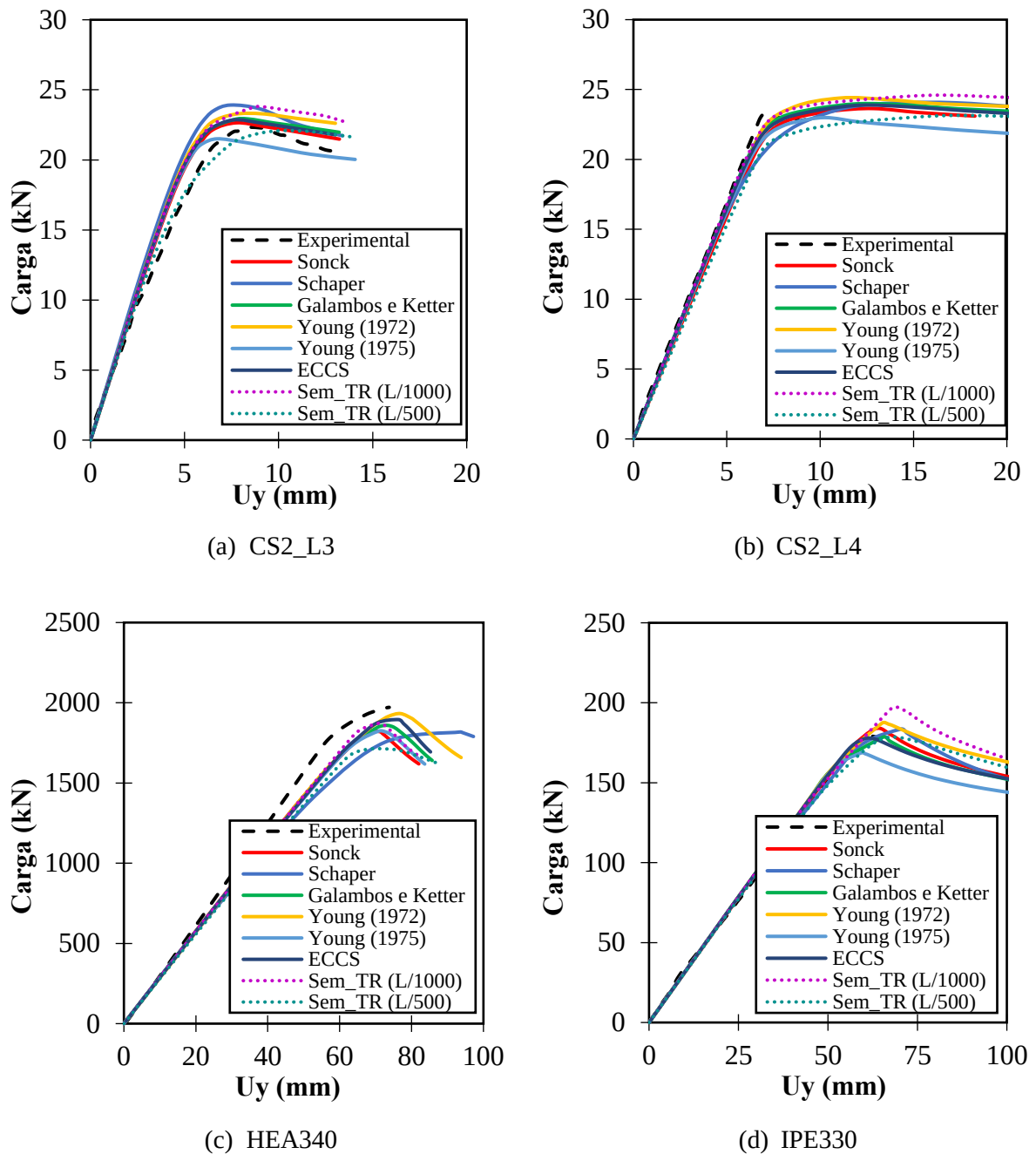
Devido à sua divergência considerável em relação aos demais, é evidente que o modelo HEA340 exerce influência significativa na variação dos resultados da modelagem de vigas celulares (Tabela 7.1 e Figura 7.3). Notavelmente, ao desconsiderar o modelo HEA340, há redução substancial no CoV, levando o coeficiente de variação a zero; isto tornaria o modelo de tensões residuais da ECCS (1984) o mais adequado.

Figura 7.3 - Razões P_{EXP}/P_{NUM} para vigas celulares sob diferentes modelos de tensões residuais e amplitudes de imperfeições geométricas

Fonte: Autor (2025)

Todos os modelos de tensões residuais apresentaram, em geral, boa concordância com os resultados experimentais (Tabela 7.1, Figura 7.3 e Figura 7.4), com valores médios de 3% a 5% e variações entre 2% e 7%.

Figura 7.4 – Avaliação do comportamento força-deslocamento para cada modelo de viga celular



Fonte: Autor (2025)

O modelo da ECCS (1984) apresentou um valor médio de 1,00 com variação de 2,5%, indicando uma excelente correlação com os resultados. O modelo de Schaper *et al.* (2022) apresentou valor médio de 0,99; no entanto, seus resultados são menos confiáveis devido à variação de 7,05%. Os modelos de Sonck (2014) e Galambos e Ketter (1959) apresentaram valores médios de 1,01, embora o primeiro tenha apresentado maior variação, 5,09% contra 3,68%. Os modelos de Young (1972) e Young (1975) apresentaram variações relativamente

pequenas em seus resultados; no entanto, são inadequados devido aos desvios significativos nos valores médios, de 0,97 e 1,05, respectivamente.

Quanto aos modelos que consideram apenas imperfeições geométricas com amplitudes variando de $L/1000$ a $L/500$, ambos apresentaram altos coeficientes de variação, de 7,21% e 6,97%, respectivamente, além de desvios significativos nos valores médios, de 0,96 e 1,05. Esses representam as maiores variações entre todos os modelos em elementos finitos analisados. Os modelos com imperfeições de $L/1000$ apresentaram predominantemente valores de P_{NUM} maiores que P_{EXP} , enquanto o oposto ocorreu nos modelos com $L/500$. Isso indica que imperfeições geométricas maiores reduzem significativamente a capacidade de carga dos elementos estruturais.

Conclui-se que adotar apenas $L/1000$ como imperfeição global pode superestimar os resultados do modelo numérico, ressaltando a importância da inclusão das tensões residuais na análise. Uma imperfeição maior levou a resultados que, em geral, apresentaram melhor concordância com os ensaios experimentais, frequentemente subestimando ligeiramente os valores, mas permanecendo próximos. Essa imperfeição maior, de modo geral, pode representar tanto imperfeições geométricas quanto materiais. No entanto, a consideração combinada das imperfeições geométricas e das tensões residuais continua sendo recomendada, uma vez que o modelo HEA340 apresentou uma divergência de 16% em relação ao ensaio experimental quando apenas a amplitude maior de imperfeição geométrica foi considerada.

7.1.2 Sensibilidade de vigas de alma cheia em aço de alta resistência

Conforme mostrado anteriormente na etapa de validação, o modelo descontínuo proposto por Wang *et al.* (2021) demonstrou melhor precisão na previsão do comportamento carga-deslocamento e da razão de carga última entre o ensaio experimental e os resultados em elementos finitos. Nesse contexto, a Tabela 7.2 adota esse modelo constitutivo descontínuo para representar o comportamento de todos os modelos em aço de alta resistência.

Tabela 7.2 – Influência do padrão de tensões residuais na capacidade resistente de vigas de alma cheia em aço de alta resistência

Teste	P_{Test} (kN)	Xiong ^{a,b}	Galambos e Ketter	Young (1972)	Young (1975)	ECCS	Schaper	Sem TR (L/1000)	Sem TR (L/500)
450-1-3	496.00	1.12 ^a	1.01	0.86	0.88	0.99	0.97	0.87	0.92
450-1-4	571.40	1.04 ^a	0.97	0.78	0.92	0.96	1.01	0.76	0.78
270-3.5	321.94	1.01 ^b	0.97	0.93	0.96	0.98	0.96	0.91	0.95
270-4	256.4	1.07 ^b	1.12	1.00	1.02	1.04	1.01	0.98	1.01
	μ	1.06	1.02	0.89	0.94	0.99	0.99	0.88	0.92
	σ	0.05	0.07	0.09	0.06	0.03	0.03	0.09	0.10
	CoV	4.39%	6.95%	10.18%	6.68%	3.15%	2.56%	10.54%	10.50%

^a Valores de tensão residual aferidos experimentalmente por Xiong *et al.* (2022)

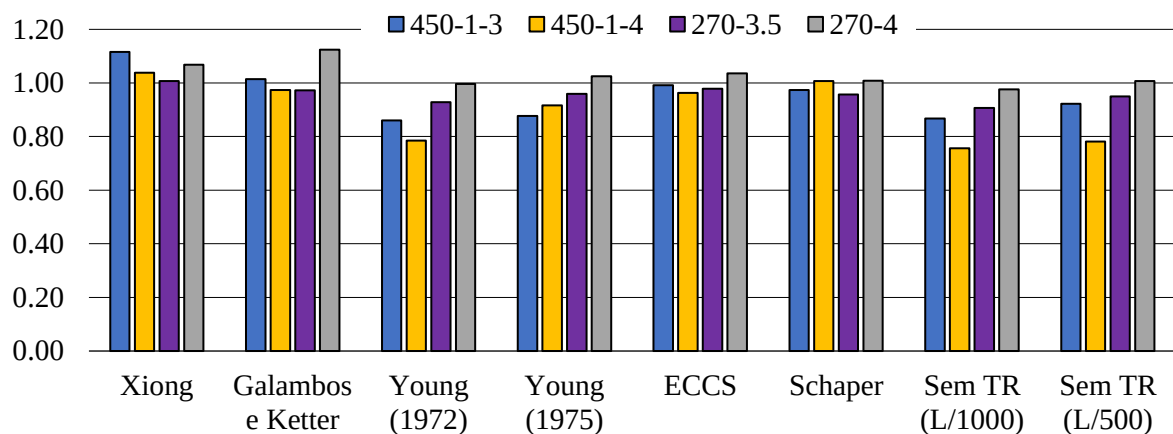
^b Valores de tensão residual aferidos experimentalmente por Xiong *et al.* (2021)

^c Valores com apenas imperfeição geométrica, sem tensão residual

Fonte: Autor (2025)

Os resultados da influência de diferentes imperfeições em vigas de alma cheia em aço de alta resistência podem ser claramente visualizados na Figura 7.5.

Figura 7.5 – Razões P_{EXP}/P_{NUM} para vigas de alma cheia sob diferentes modelos de tensões residuais e amplitudes de imperfeições geométricas

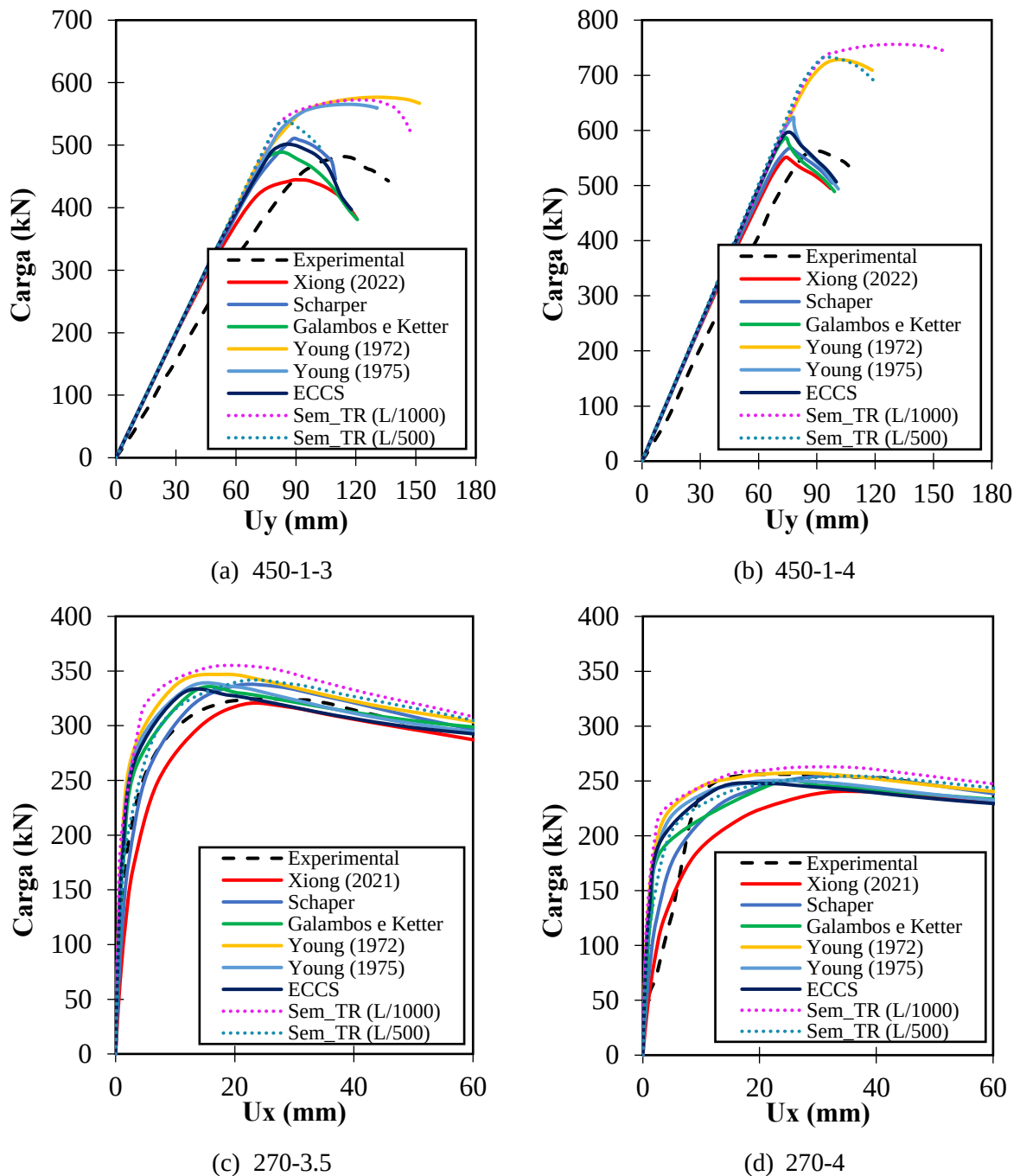


Fonte: Autor (2025)

O modelo de Young (1972) não é representativo para vigas em aço de alta resistência, devido à diferença significativa nos resultados, apresentando um alto coeficiente de variação e um valor médio de 89%. Embora esse modelo tenha mostrado 100% de correlação para a viga 270-4, o modelo 450-1-4 apresentou a pior concordância com os resultados experimentais, com

uma correlação de apenas 78%, tornando-o o padrão de tensões residuais menos preciso entre os analisados. Em termos de comportamento carga-deslocamento, este modelo é totalmente inadequado, como mostrado na Figura 7.6.

Figura 7.6 – Avaliação do comportamento força-deslocamento para cada modelo de viga de alma cheia em aço de alta resistência



Fonte: Autor (2025)

Os modelos de Galambos e Ketter (1959) e Young (1975) apresentaram variações semelhantes, de 6,95% e 6,68%, respectivamente (Tabela 7.3). No entanto, o primeiro modelo

mostrou-se mais aplicável ao se considerar a resposta carga-deslocamento (Figura 7.6). Os modelos de ECCS (1984) e de Schaper *et al.* (2022) apresentaram o mesmo valor médio de 0,99, com variações de 3,15% e 2,56%, respectivamente. Em termos de comportamento força-deslocamento, os modelos são semelhantes (Figura 7.6).

Os modelos numéricos que consideraram apenas imperfeições geométricas iniciais apresentaram maiores variações entre todos os resultados, com valores de 10,54% para amplitude $L/1000$ e 10,50% para $L/500$. Além disso, ao considerar apenas a imperfeição geométrica $L/1000$, sem incluir tensões residuais, foi obtido valor médio igual a 0,88; isto indica que a imperfeição geométrica e as tensões residuais devem ser combinadas para melhorar a representatividade da análise numérica.

Embora a amplitude $L/500$ tenha resultado em melhor concordância, isso não aconteceu para todos os modelos avaliados; por exemplo, o modelo B450-1-4 apresentou 78% de relação além da grande variação e resposta força-deslocamento insatisfatória (Figura 7.6). Isso indica que essa abordagem também não é uma representação confiável.

7.1.3 Sensibilidade de vigas celulares em aço de alta resistência

Para analisar a sensibilidade de vigas celulares fabricadas com aços de alta resistência, foi realizado um estudo paramétrico adicional. Para isso, foram utilizados os aços das classes S460, S550, S690 e S860, com limites de resistência ao escoamento de 460 MPa, 550 MPa, 690 MPa e 860 MPa, respectivamente. Neste estudo, foi avaliada a influência de diversos padrões de tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais na estabilidade global das vigas celulares em aço de alta resistência. Um fator que considera o limite de escoamento foi utilizado como parâmetro para estudar a influência da intensidade das tensões residuais no modelo de Sonck (2014). Devido à excelente correlação entre modelo numérico e resposta experimental, a viga IPE330 foi utilizada nesta análise. Os resultados da capacidade resistente são apresentados na Tabela 7.3 e na Figura 7.7 e as respostas força-deslocamento na Figura 7.8.

Tabela 7.3 - Valores de força última do modelo IPE330 para diferentes imperfeições e classes de aço

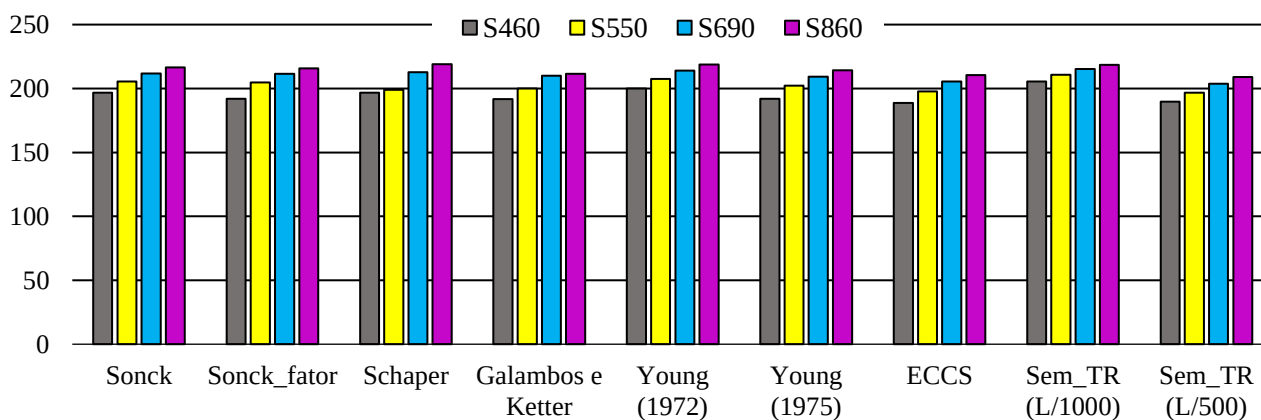
Modelos de Tensão Residual	aço			
	S460	S550	S690	S860
	(kN)			
Sonck (2014)	196.64	205.43	211.71	216.4
Sonck_fator ⁽¹⁾	192.04	204.67	211.48	215.68
Schaper <i>et al.</i> (2022)	196.79	199.05	212.75	218.98
Galambos e Ketter (1959)	191.62	199.93	209.94	211.55
Young (1972)	199.91	207.52	214.06	218.65
Young (1975)	192	202.34	209.18	214.15
ECCS (1984)	188.83	197.73	205.59	210.54
Imperfeição geométrica – sem aplicação de tensão residual				
Sem_TR (L/1000)	205.53	210.8	215.31	218.47
Sem_TR (L/500)	189.69	196.86	203.72	209.12
μ	194.78	202.70	210.42	214.84
σ	5.430	4.745	3.797	3.716
CoV	2.79%	2.34%	1.80%	1.73%

⁽¹⁾ Fator aplicado no modelo de Sonck (2014)

Fonte: Autor (2025)

A variabilidade associada às imperfeições diminui à medida que o limite de escoamento aumenta (Tabela 7.3 e Figura 7.7). O fator aplicado no modelo de Sonck (2014) não resultou em diferença significativa em comparação com o modelo original, indicando que a resistência ao escoamento não é um parâmetro relevante nesse padrão. A variação dos resultados em relação ao ensaio com o modelo IPE330 apresentado na Tabela 7.1 é visivelmente maior do que a observada para os modelos em aço de alta resistência apresentados na Tabela 7.3.

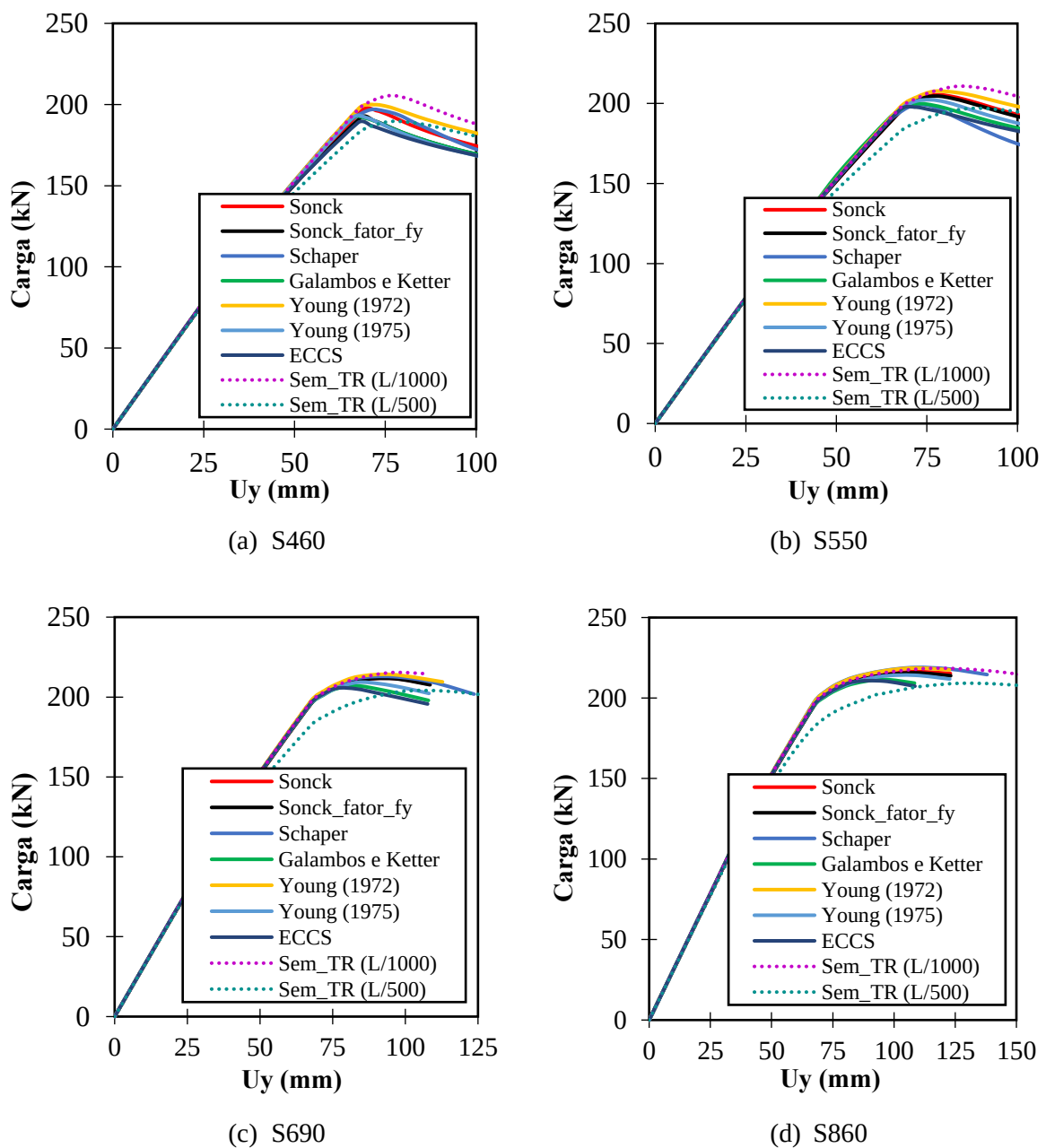
Figura 7.7 – Capacidade resistente da viga IPE330 para várias imperfeições e classes de aço



Fonte: Autor (2025)

Comparado aos demais padrões de tensões residuais, a aplicação do modelo de Young (1972) produziu resultados não conservadores (Figura 7.7 e Tabela 7.3). Por outro lado, o modelo do ECCS (1984) apresentou resultados conservadores, seguido pelo modelo de Galambos e Ketter (1959). Quanto a resposta força-deslocamento, todos os modelos apresentaram um padrão semelhante (Figura 7.8), com as curvas tendendo a ser mais semelhantes à medida que a resistência ao escoamento aumenta.

Figura 7.8 – Influência da classe de aço no comportamento força-deslocamento para o modelo de viga celular IPE330



O uso de imperfeição geométrica inicial com amplitude de $L/1000$ retornou, em geral, em resultados não conservadores. De modo geral, as tensões residuais mostraram menor relevância na capacidade resistente à FLT de vigas celulares em aço de alta resistência. Por outro lado, ao aumentar a imperfeição para $L/500$, os resultados se tornaram conservadores, indicando que os modelos numéricos são significativamente sensíveis às imperfeições iniciais maiores, em comparação às tensões residuais. Além disso, independentemente da resistência ao escoamento, o comportamento força-deslocamento variou de forma mais expressiva para $L/500$.

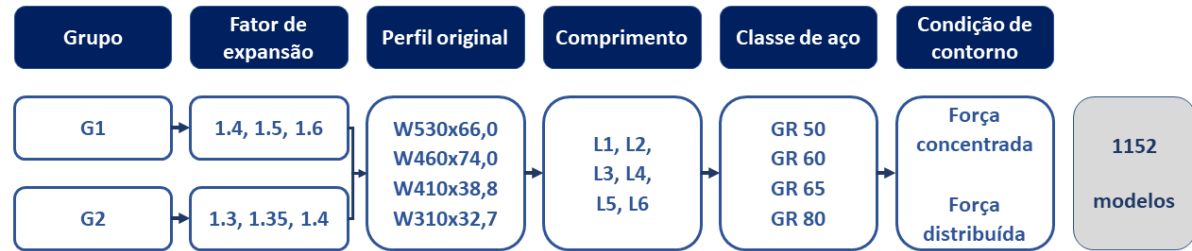
Para concluir, verificou-se que os modelos numéricos de vigas celulares em aço de alta resistência foram mais sensíveis às imperfeições geométricas iniciais do que às tensões residuais, indicando que o efeito das imperfeições geométricas é mais significativo.

7.2 Estudo paramétrico 2 - Capacidade resistente de vigas celulares em aço de alta resistência

Para avaliar a influência da resistência ao escoamento do aço na capacidade resistente de vigas celulares, foi realizado um estudo paramétrico (Figura 7.9) composto de 1152 modelos. Os diferentes parâmetros considerados representam, de forma próxima, a aplicabilidade das vigas celulares na construção civil. Os modelos numéricos foram classificados em dois grupos, G1 e G2, em função do diâmetro das aberturas, comprimento e uso da viga, conforme ACB (2020).

Na Tabela 7.4 é apresentado um panorama dos diversos parâmetros geométricos, conforme a designação do grupo da viga celular. Para abranger diferentes modos de falha e avaliar relações típicas de esbeltez $\chi - \lambda$ nos modelos, foram considerados diversos valores de comprimento, de forma a representar vigas curtas, intermediárias e longas. Nesse contexto, a esbeltez relativa $\bar{\lambda}$ variou entre 0.65 e 6.5. Os comprimentos das vigas também foram escolhidos com base na aplicabilidade prática, utilizando valores inteiros definidos, de modo que, para vigas com enrijecedor central, a carga fosse aplicada exatamente no montante de alma intermediário da viga, garantindo que a aplicação não centralizasse um enrijecedor em uma abertura. Com isso, valores de montante de extremidade, número de aberturas e outros parâmetros foram variados em cada modelo numérico.

Figura 7.9 – Fluxograma do segundo estudo paramétrico



Fonte: Autor (2025)

Tabela 7.4 – Parâmetros geométricos das vigas celulares para o estudo paramétrico

Parâmetro	Grupo 1	Grupo 2
Seção original	4 tipos, ver Tabela 7.5	
Espaçamento	1.1h ₀	
Diâmetro de abertura	1.15h _i	0.95h _i
Fator de expansão (h/h_i)	1.4, 1.5, 1.6	1.3, 1.35, 1.4
Comprimento ^a	L ₁ , ..., L ₆	
Largura do montante de alma	0.1h ₀	

^aVariado, dependente do diâmetro da abertura (h₀), número de aberturas (n), largura do montante de alma (S₀) e de extremidade (S_e).

Fonte: Autor (2025)

A geometria dos modelos numéricos atende aos limites da norma BS EN 1993-1-13 (2024) quanto ao diâmetro máximo de abertura $h_0 \leq 0.8h$, largura mínima do montante de alma $S_0 \geq 0,1h_0$ e, mínima altura dos “tês” em tração ou compressão $y_T \geq t_f + 30\text{mm}$. Diferentes seções originais foram consideradas no estudo, abrangendo alturas pequenas e elevadas e, perfis leves e mais robustos: W310 x 32,7, W410 x 38,8, W460 x 74,0 e W530 x 66,0, cujas propriedades da seção transversal estão apresentadas na Tabela 7.5. As dimensões geométricas e nomenclaturas foram extraídas do catálogo da GERDAU (2022).

Tabela 7.5 – Propriedades da seção transversal dos perfis utilizados

Seção original	h_i (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
W530 x 66,0	525	165	11.4	8.9
W460 x 74,0	457	190	14.5	9.0
W410 x 38,8	399	140	8.8	6.4
W310 x 32,7	313	102	10.8	6.6

Fonte: Autor (2025)

Aços com resistência convencional e de alta resistência foram utilizados neste estudo. Tendo em vista que as vigas celulares são usualmente fabricadas a partir de perfis laminados a quente, o aço A913 da ArcelorMittal© (ARCELORMITTAL, 2024) foi utilizado a fim de representar e garantir a aplicação profissional adequada de todos os modelos de vigas celulares (Tabela 7.6).

Tabela 7.6 – Propriedades mecânicas do aço A913

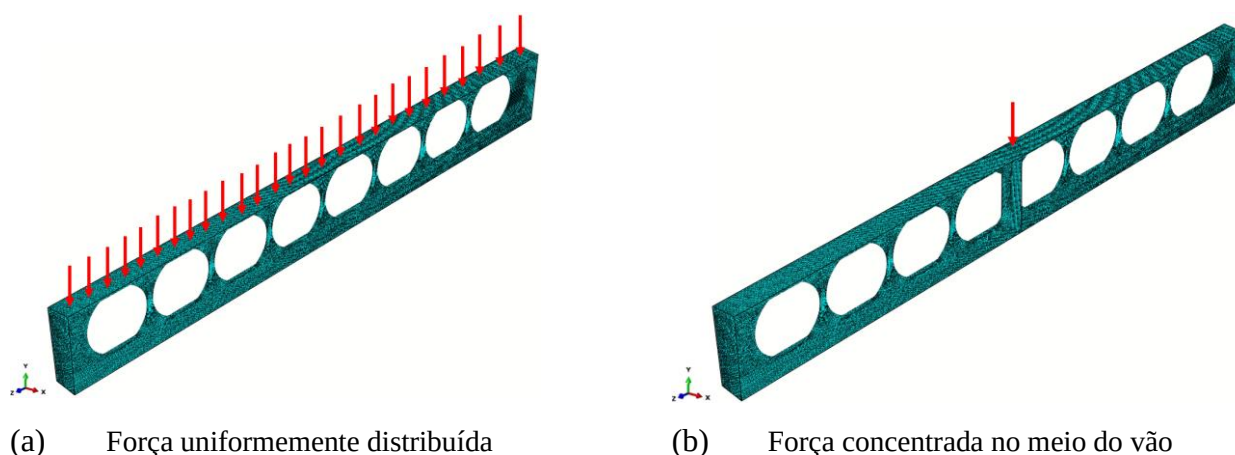
Classe de aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)
A913 Gr 50	345	450
A913 Gr 60	450	550
A913 Gr 65	485	620
A913 Gr 80	550	655

Fonte: Autor (2025)

O modelo constitutivo quadrilinear (YUN; GARDNER, 2017) foi utilizado para descrever o comportamento dos aços de resistência convencional (A913 Gr 50 e Gr 60). Por outro lado, os aços de alta resistência (A913 Gr 70 e Gr 80) foram representados pelo modelo constitutivo com escoamento descontínuo (WANG *et al.*, 2021); esta escolha foi baseada no processo de validação, conforme resultados da Tabela 6.4.

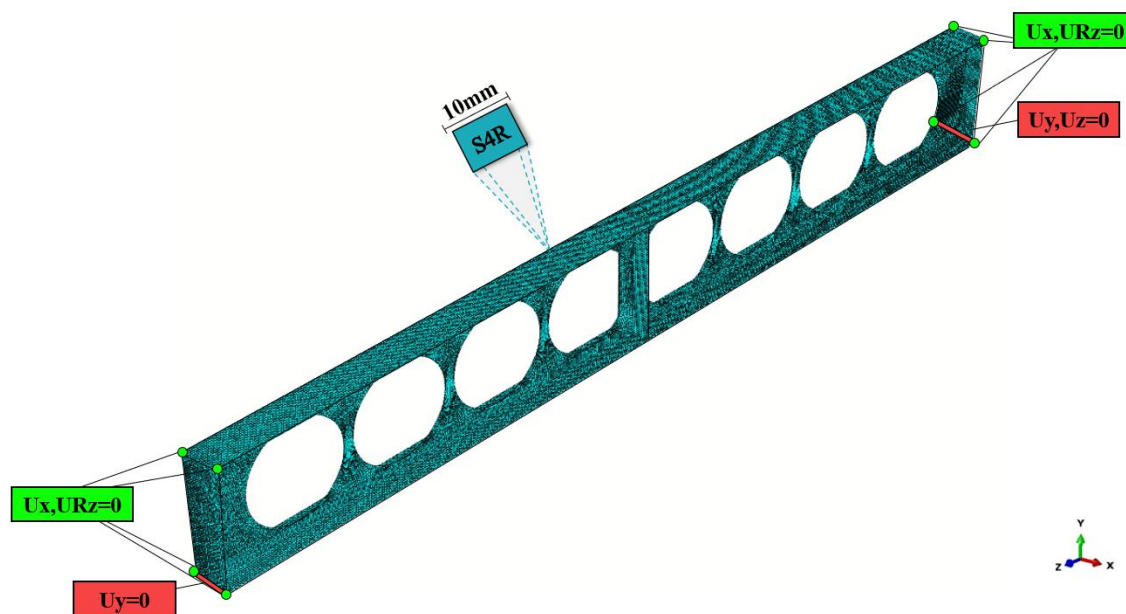
Duas condições típicas de carregamento foram avaliadas: força concentrada no meio do vão e força uniformemente distribuída ao longo da mesa superior (Figura 7.10). Todos os modelos continham vínculo de garfo, cuja condição de contorno é apresentada na Figura 7.11. Para minimizar os efeitos de instabilidade local da mesa foram introduzidos enrijecedores no ponto de aplicação da força concentrada (Figura 7.10). As condições de carregamento consideram o efeito desestabilizante, por ser o mais comum e crítico.

Figura 7.10 – Condições de carregamento



Fonte: Autor (2025)

Figura 7.11 – Densidade de malha e condição de contorno



Fonte: Autor (2025)

O modelo de distribuição de Sonck (2014) para tensões residuais (Figura 4.4) foi adotado para todos os modelos numéricos de viga celular, tanto em aço comum quanto em aço de alta resistência. Como visto na análise de sensibilidade, este modelo se mostrou eficiente para representar as tensões residuais em modelos numéricos de vigas celulares, independentemente da resistência ao escoamento do aço. A imperfeição geométrica inicial foi modelada com a amplitude apresentada conforme a equação (2).

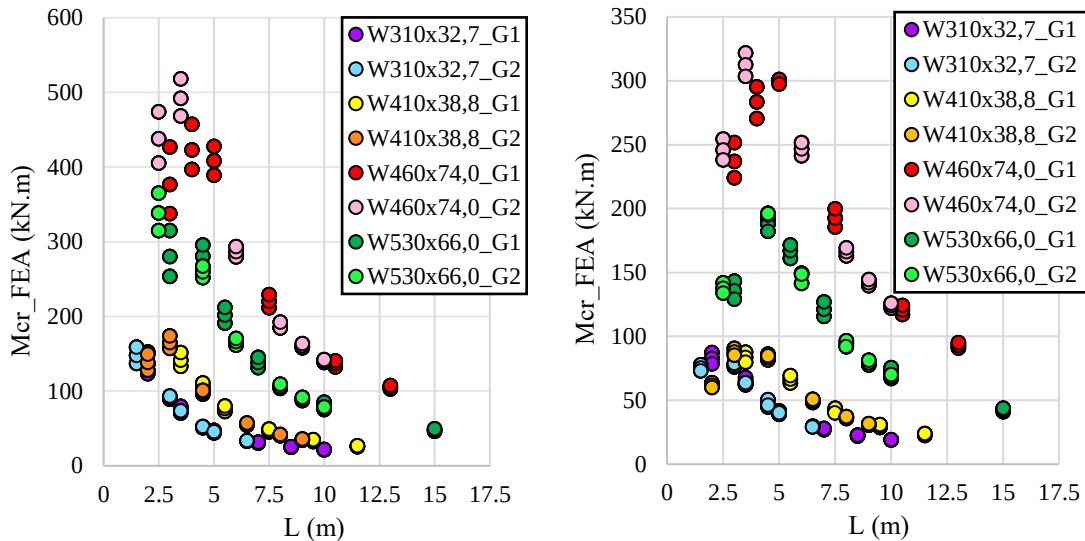
Análises de estabilidade elástica (linear) foram realizadas para determinar o momento crítico. Posteriormente, a imperfeição foi inserida na análise não linear geométrica e física. Foram realizadas 1152 simulações não lineares cujos resultados compõem um banco de dados para avaliação da aplicabilidade da formulação proposta no EC3 (2024) para previsão da capacidade resistente de vigas celulares. Os resultados são apresentados e discutidos nas seções seguintes.

7.2.1 Análise de estabilidade elástica

Na Figura 7.12 são mostrados os valores de momento crítico para todos os modelos numéricos de vigas celulares submetidas tanto a força concentrada quanto uniformemente distribuída, em função do comprimento da viga. Observa-se uma tendência clara de diminuição do momento crítico com o aumento do comprimento da viga. Além disso, o aumento do fator de expansão resulta em maiores valores de momento crítico, particularmente mais pronunciados

em vãos curtos. Para vigas idênticas (comprimento, perfis originais e alturas finais), aquelas do Grupo 2 apresentam momentos críticos maiores que as do Grupo 1, destacando a influência de parâmetros geométricos na capacidade resistente à flexão.

Figura 7.12 – Valores de momento crítico numérico



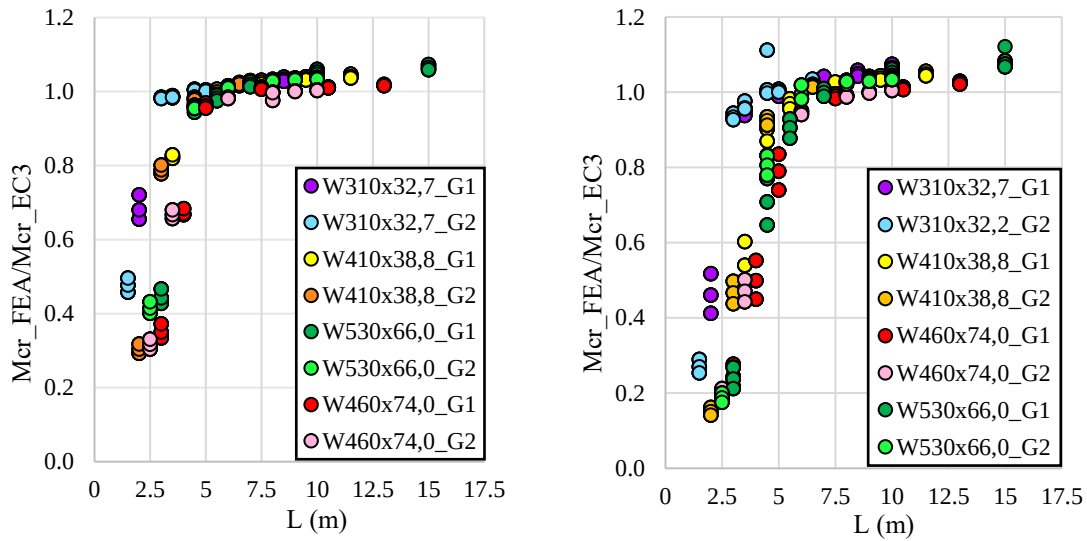
(a) Força concentrada no meio do vão

(b) Força uniformemente distribuída

Fonte: Autor (2025)

Subsequentemente, os valores de momento crítico extraídos da modelagem numérica foram comparados aos oriundos do procedimento simplificado de cálculo do EC3 (2024). Para quantificar as diferenças entre valores da modelagem e prescrições normativas foram calculadas as razões ($M_{cr,FEA}/M_{cr,EC3}$). A comparação demonstra claramente que o EC3 (2024) fornece estimativas excessivamente contrárias à segurança para vigas curtas (Figura 7.13). No entanto, para vãos iguais ou superiores a 5 metros, há boa correlação de resultados, indicando que o procedimento normativo fornece uma previsão adequada do momento crítico para estes casos.

Figura 7.13 – Relação entre M_{cr} numérico e normativo em função do vão



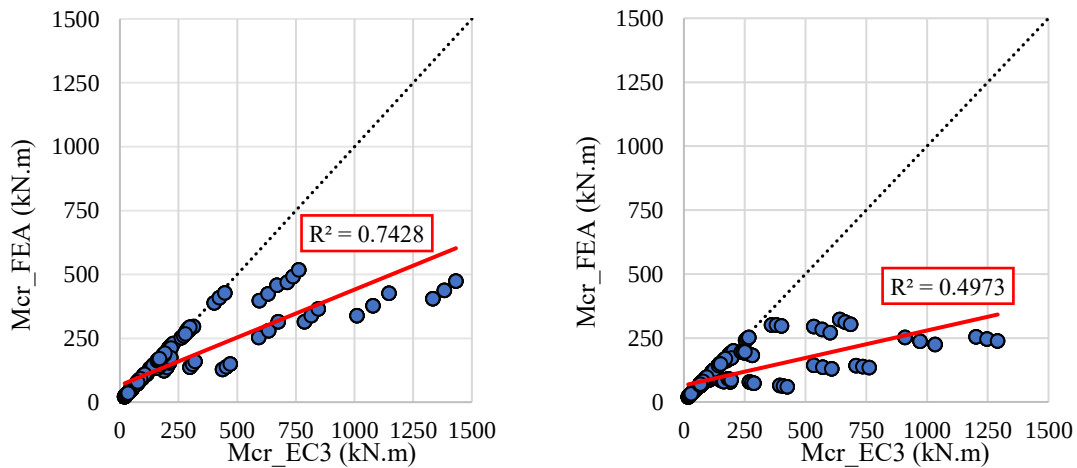
(a) Força concentrada no meio do vão

(b) Força uniformemente distribuída

Fonte: Autor (2025)

Embora as previsões do EC3 (2024) tenham fornecido valores significativamente mais elevados para vigas curtas, observou-se que a interação entre modos de instabilidades ocorre antes da flambagem elástica; estes fenômenos são capturados nos modelos numéricos, mas não considerados no modelo analítico simplificado. Apesar disso, a discrepância entre previsões normativas e modelos numéricos parece ter impacto limitado e pode ser razoavelmente desconsiderada. A comparação dos valores de momento crítico estimados por prescrições do EC3 (2024) mostra correlação linear fraca (Figura 7.14); esse comportamento já foi previamente discutido e justificado.

Figura 7.14 – Comparação entre resultados do EC3 e numérico para M_{cr}



(a) carga concentrada no meio do vão

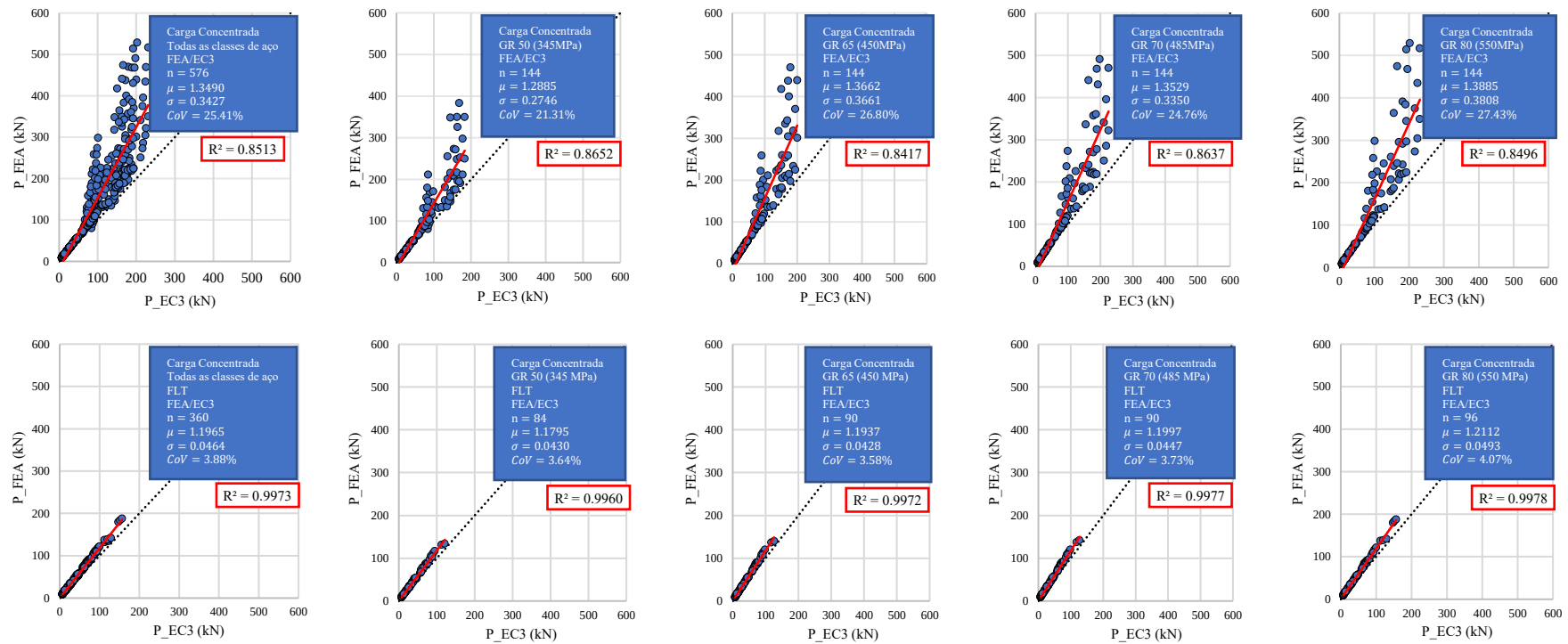
(b) carga uniformemente distribuída

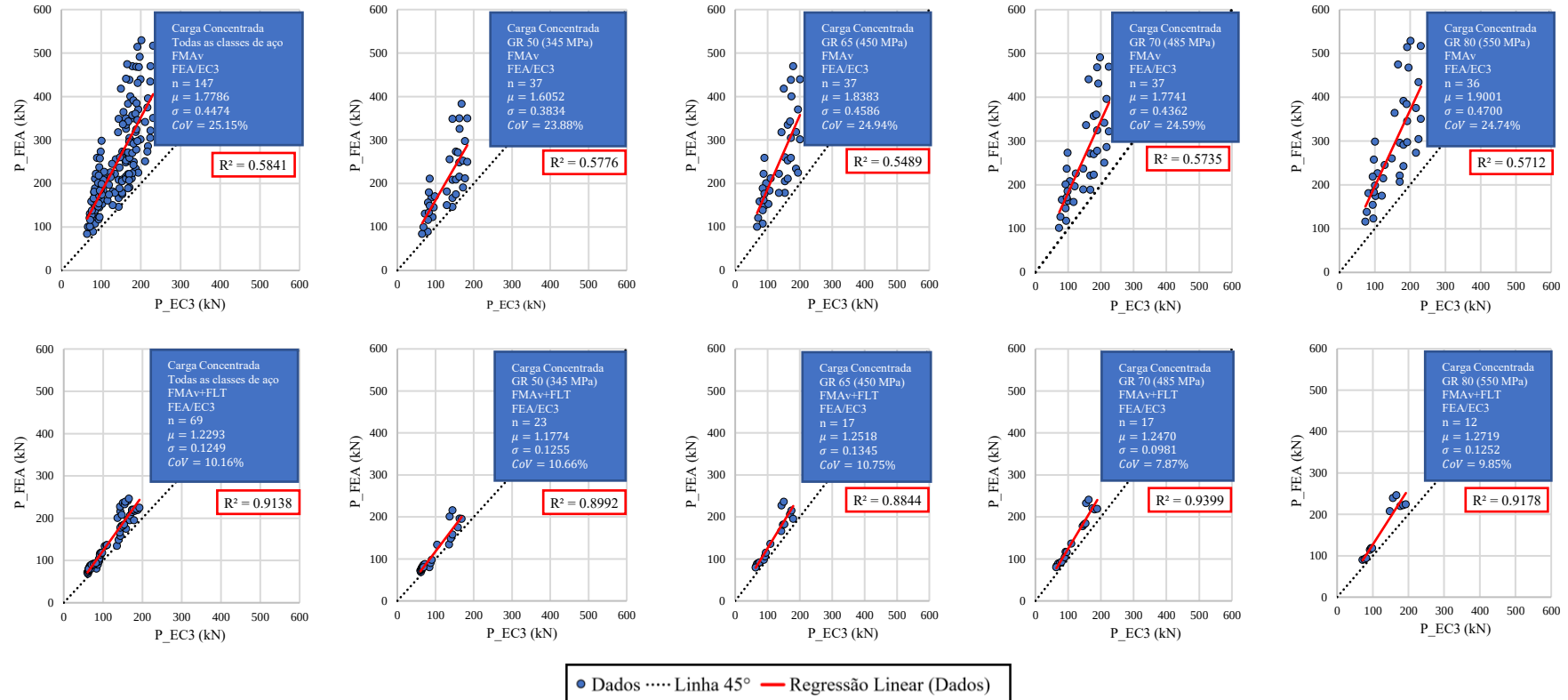
Fonte: Autor (2025)

7.2.2 Análise não linear: força concentrada no meio do vão

A Figura 7.15 traz a comparação entre valores de força máxima previstos pelo EC3 (2024) e pela modelagem numérica para diferentes classes de aço. Os resultados indicam que o procedimento do EC3 prevê a capacidade resistente de vigas celulares submetidas à força concentrada no meio do vão, com precisão razoável, porém há tendência de subestimar os valores previstos. Dos 576 modelos analisados, 360 falharam por FLT (62,50%), 147 (25,52%) por FMAv, e 69 (11,98%) por interação entre estes dois modos de falha (FMAv+FLT).

Figura 7.15 – Comparação da capacidade resistente do modelo numérico em relação ao EC3 para força concentrada no meio do vão





Fonte: Autor (2025)

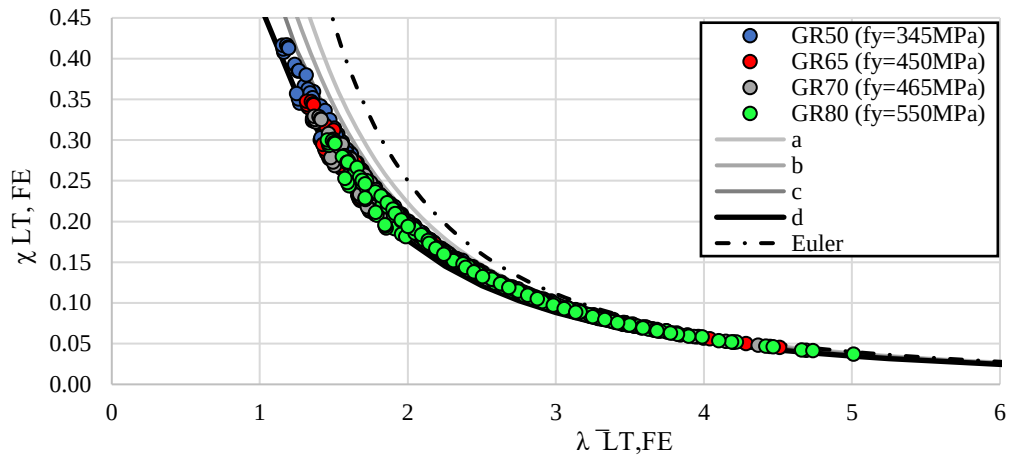
A previsão da capacidade resistente à FLT apresentou o maior nível de precisão dentre todos os modelos avaliados, com coeficiente de correlação linear superior a 0,99 e baixa dispersão, conforme indicado pelo baixo coeficiente de variação (Figura 7.15). Embora os resultados tenham se tornado progressivamente mais conservadores com o aumento da classe do aço, ainda representaram de forma adequada a capacidade resistente das vigas celulares. Portanto, esses resultados indicam que o EC3 (2024) leva a previsões adequadas e precisas da capacidade resistente à FLT, tanto para vigas celulares em aço comum quanto em aço de alta resistência.

O modo de falha FMAv foi também observado nos modelos numéricos submetidos à esta condição de carregamento. Para esta situação, houve baixo nível de precisão, evidenciada por um coeficiente de correlação linear inferior a 0,6 (Figura 7.15). Portanto, para este modo de falha em específico, as prescrições de projeto do EC3 (2024) são altamente conservadoras. Esse conservadorismo se torna mais acentuado com o aumento da classe do aço, acompanhado de uma maior divergência em relação aos resultados numéricos, refletida por um coeficiente de variação de aproximadamente 24%.

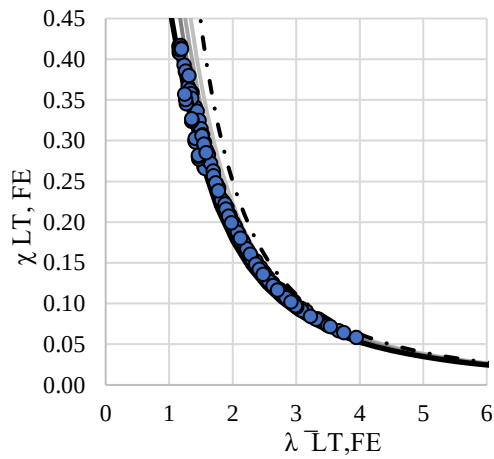
Interações entre FLT e FMAv foram identificadas para os modelos submetidos à força concentrada no meio do vão. No entanto, as prescrições atuais do EC3 (2024) não incluem uma metodologia específica para avaliação da interação entre esses dois modos de falha. Consequentemente, os resultados foram analisados com base no modo de falha predominante, seja ele governado por FLT ou FMAv. Apesar desta simplificação, os resultados da modelagem apresentam boa correlação com aqueles previstos pelo EC3 (2024).

Os resultados gerais $(\chi_{LT,FE} - \bar{\lambda}_{LT,FE})$ para os modelos numéricos submetidos à carga concentrada no meio do vão são apresentados na Figura 7.16 sobre as curvas de resistência da BS EN 1993-1-1 (ECS, 2022). Dada a significativa quantidade de modelos analisados, os modos de falha foram identificados em intervalos relacionados à esbeltez relativa, para cada classe de aço (Tabela 7.7).

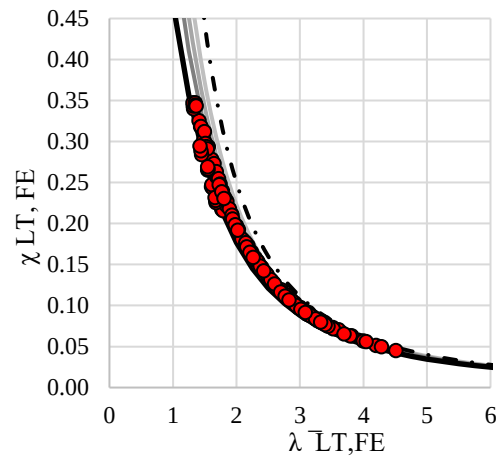
Figura 7.16 – Resultados da modelagem numérica de vigas sujeitas à força concentrada



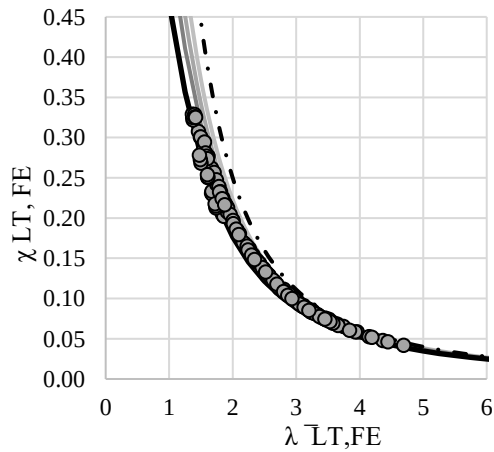
(a) Todas as classes de aço



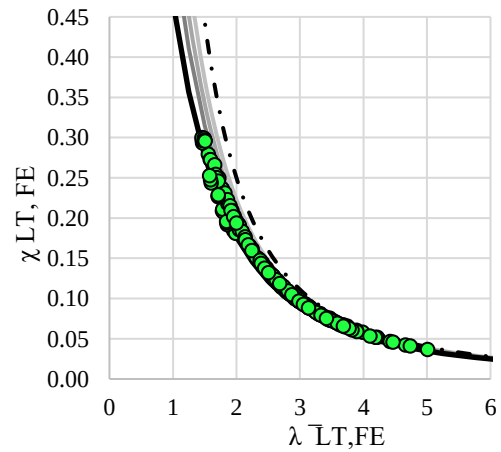
(b) GR 50 ($f_y=345\text{MPa}$)



(c) GR 65 ($f_y=450\text{MPa}$)



(d) GR 70 ($f_y=485\text{MPa}$)



(e) GR 80 ($f_y=550\text{MPa}$)

Fonte: Autor (2025)

Tabela 7.7 – Intervalos de esbeltez para cada classe de aço e modo de falha dos modelos submetidos à força concentrada no meio do vão

Falha	A913 Gr 50	A913 Gr 65	A913 Gr 70	A913 Gr 80
FMAv	$1.15 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.56$	$1.32 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.79$	$1.37 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.86$	$1.45 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.98$
FMAv+FLT	$1.44 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.81$	$1.65 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.08$	$1.71 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.16$	$1.82 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.3$
FLT	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 1.75$	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 1.89$	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 1.96$	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 1.93$

Fonte: Autor (2025)

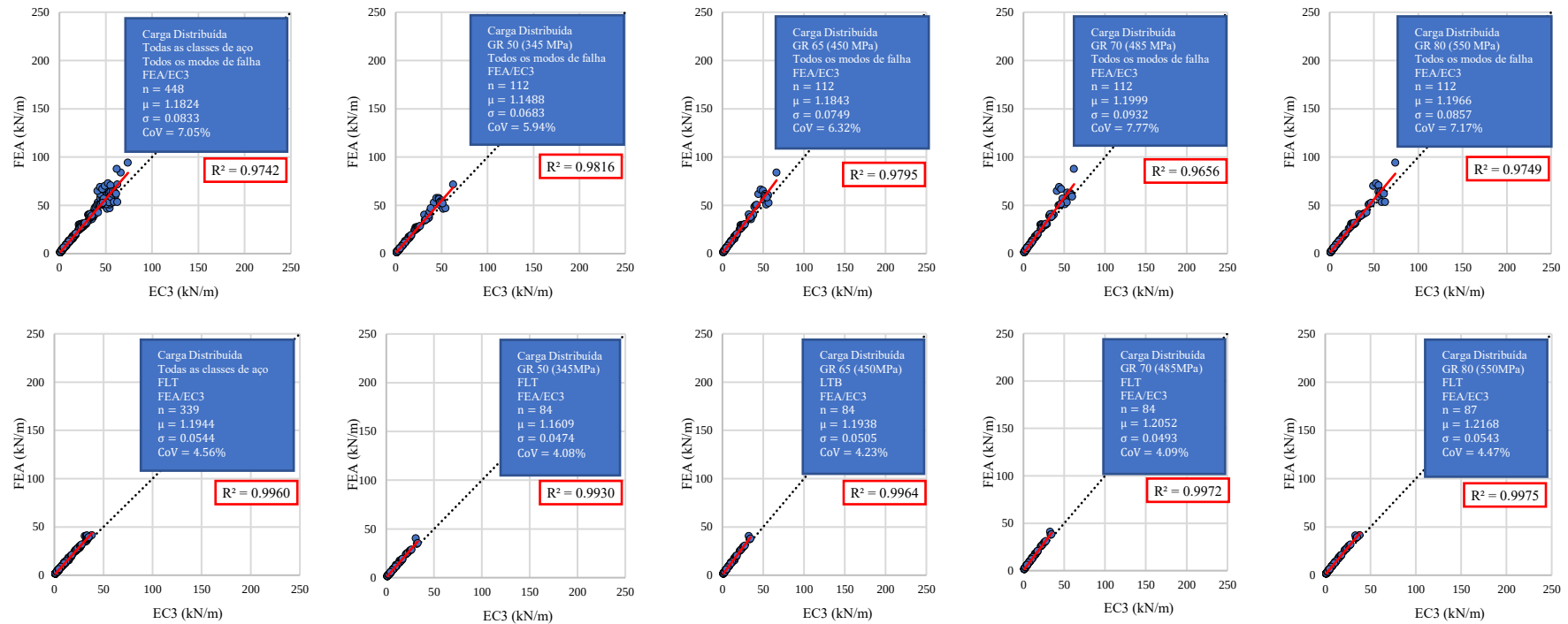
A Figura 7.15 também ilustra que a aplicação de aços de alta resistência em vigas celulares levou à redução da ocorrência de modos de instabilidade local. Especificamente, para os modelos com força concentrada no meio do vão, o número de vigas que apresentaram falha por FMAv diminuiu à medida que a classe do aço aumentou, enquanto foi observada tendência oposta para falhas globais por FLT. Esse comportamento é corroborado pela diminuição do número de modelos numéricos que falharam pela interação entre FLT e FMAv com o aumento da resistência do aço.

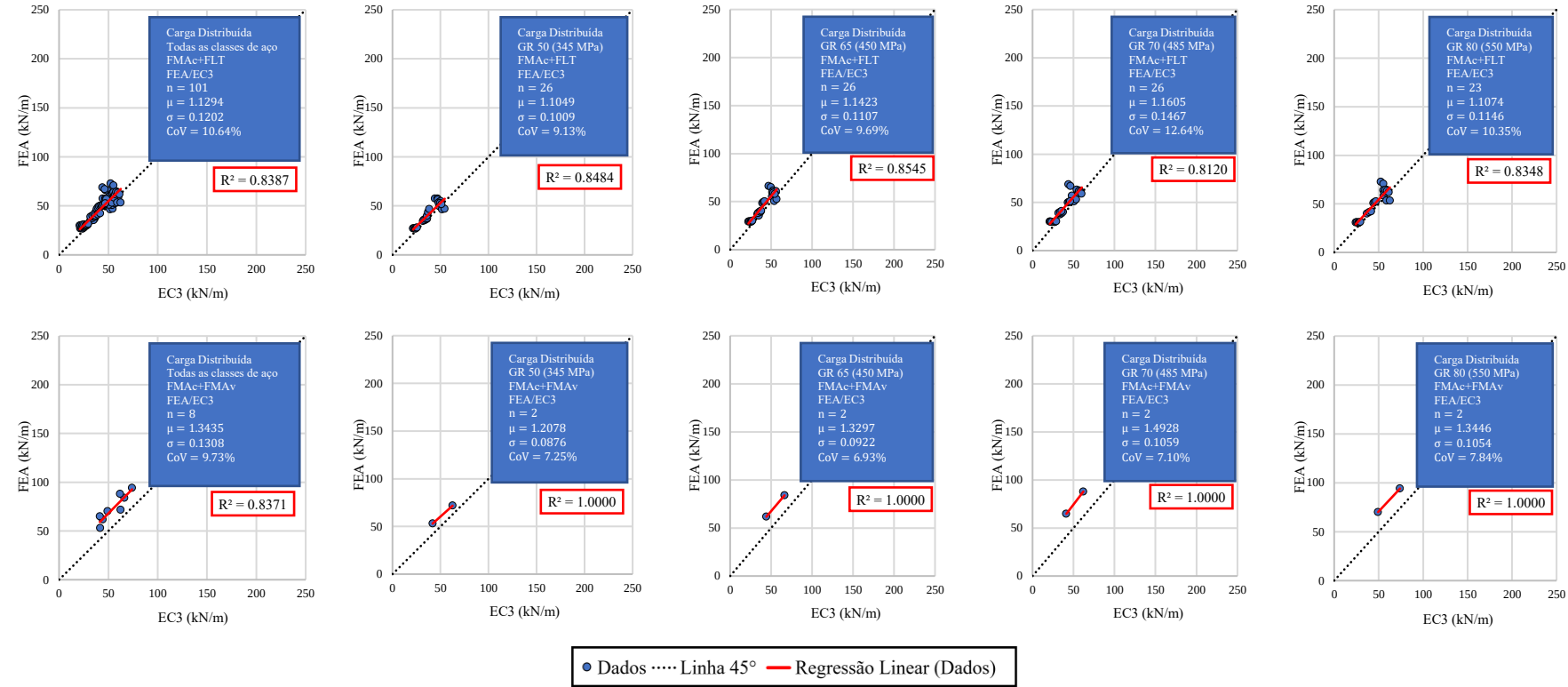
7.2.3 Análise não linear: força uniformemente distribuída

Embora os resultados dos modelos de vigas celulares submetidos à força uniformemente distribuída apresentem uma melhor correlação linear, alguns dados indicam que a norma europeia é conservadora em comparação com os resultados numéricos, revelando que o procedimento de verificação subestima a capacidade resistente em algumas situações (Figura 7.17). Ainda que o EC3 (2024) não apresente um procedimento específico para verificação da FMA devido aos esforços de compressão (FMAc), esse modo de falha foi observado nas análises numéricas. Devido a esta ausência, não foi possível comparar os valores de capacidade resistente extraídos da modelagem numérica de vigas que apresentaram este modo de falha. Dos 576 modelos em elementos finitos analisados, 339 apresentaram falha por FLT (58,85%), 128 por FMAc (22,22%), 101 (17,53%) por interação entre FMAc e FLT, e 8 (1,48%) por interação entre FMAc e FMAv.

Assim como observado para força concentrada aplicada no meio do vão, para força uniformemente distribuída a capacidade resistente à FLT se mostrou efetiva em termos estatísticos, com correlação linear excedendo 0,99. Apesar de os resultados se tornarem mais conservadores com o aumento da classe de aço, esta diferença não é tão evidente. Com isso, entende-se que as previsões de capacidade resistente à FLT apresentadas pelo EC3 (2024) são adequadas para vigas celulares de aço comum e de alta resistência.

Figura 7.17 – Comparação da capacidade resistente do modelo numérico em relação ao EC3 para força uniformemente distribuída

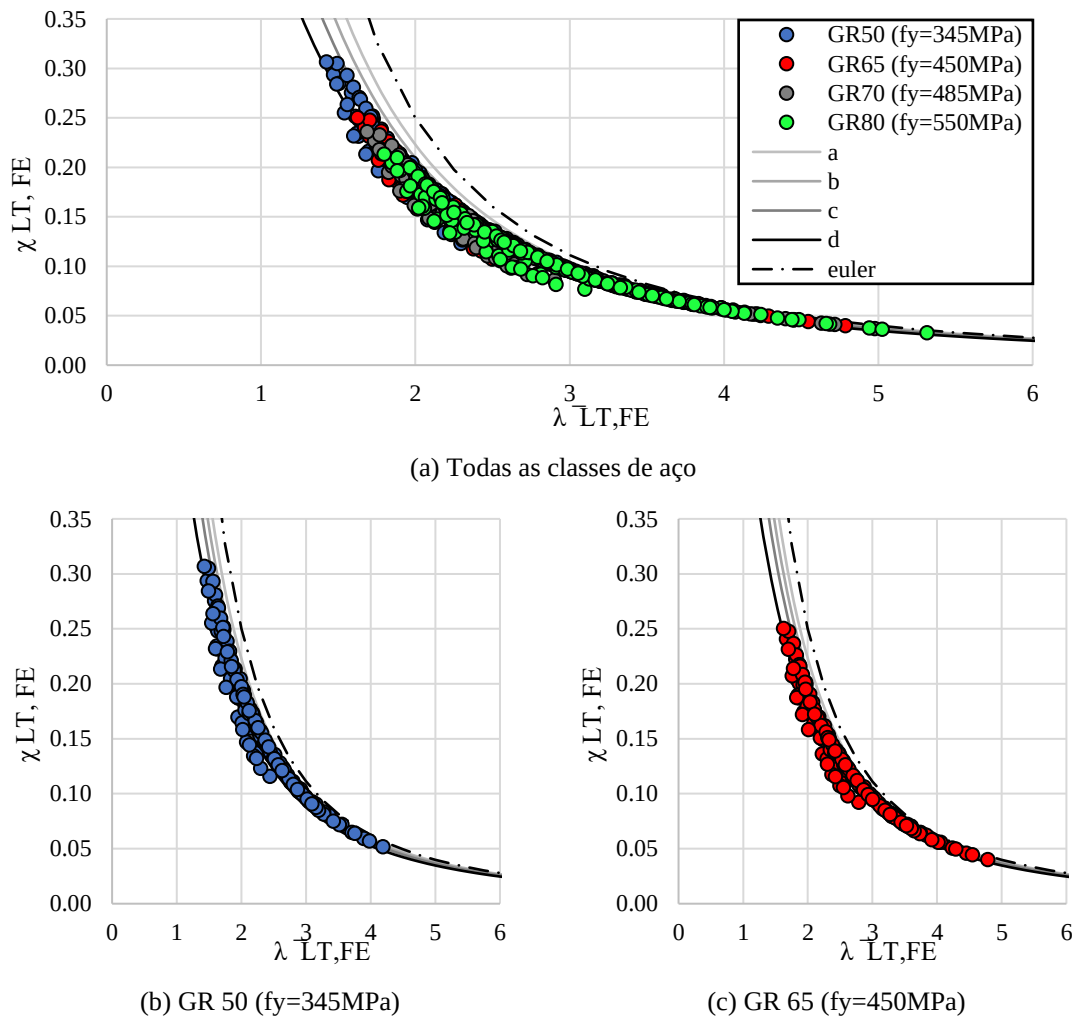


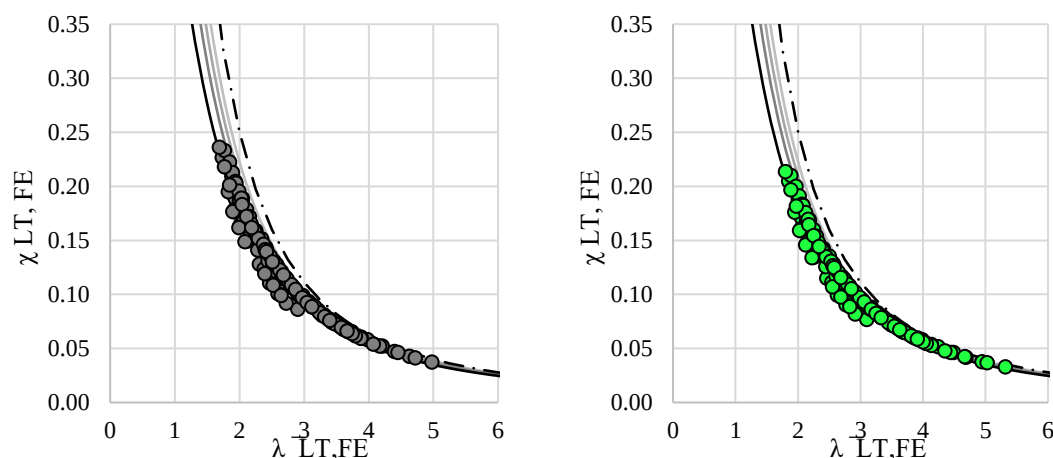


Fonte: Autor (2025)

Os resultados gerais ($\chi_{LT,FE} - \bar{\lambda}_{LT,FE}$) para os modelos numéricos submetidos à carga uniformemente distribuída são ilustrados (Figura 7.18). A mesma abordagem utilizada para a condição de carregamento anterior foi empregada, de modo a representar os modos de falha em intervalos relacionados à esbeltez relativa, para cada classe de aço (Tabela 7.8).

Figura 7.18 – Resultados da modelagem numérica de vigas sujeitas à força uniformemente distribuída



(d) GR 70 ($f_y=485\text{MPa}$)(e) GR 80 ($f_y=550\text{MPa}$)

Fonte: Autor (2025)

Tabela 7.8 – Intervalos de esbeltez para cada classe de aço e modo de falha dos modelos submetidos à força uniformemente distribuída

Falha	A913 Gr 50	A913 Gr 65	A913 Gr 70	A913 Gr 80
FMAc	$1.42 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.44$	$1.63 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.79$	$1.69 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.90$	$1.80 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 3.10$
FMAc+FMAv	$1.49 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.51$	$1.70 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.72$	$1.77 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.79$	$1.88 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 1.90$
FMAc+FLT	$1.56 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.12$	$1.78 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.42$	$1.85 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.52$	$1.97 < \bar{\lambda}_{LT} \leq 2.69$
FLT	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 1.72$	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 1.97$	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 2.04$	$\bar{\lambda}_{LT} \geq 2.18$

Fonte: Autor (2025)

A mesma tendência de diminuição de instabilidades locais é observada para os modelos submetidos à força uniformemente distribuída (Figura 7.17). Embora o número de vigas celulares que apresentam falha por FMAc não se altere com o aumento da classe do aço, observa-se um aumento no número de falhas por FLT com o incremento da resistência do aço. O comportamento oposto é verificado para a interação entre FMAc+FLT, cujo número de ocorrências diminui à medida que a resistência do aço aumenta.

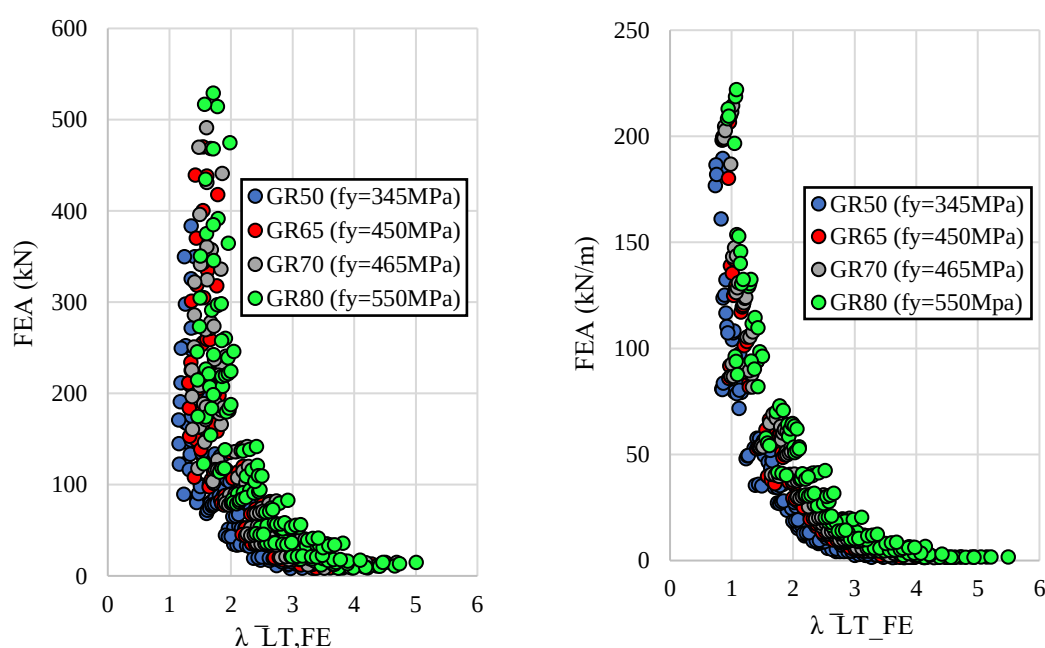
7.2.4 Análise não linear: uso de aços de alta resistência em vigas celulares

As análises revelaram uma influência clara da resistência ao escoamento na capacidade resistente das vigas celulares. Essa tendência é ilustrada na Figura 7.19, que apresenta a força última nos 1152 modelos numéricos de vigas celulares submetidas a duas condições de carregamento, em função da classe de aço. Embora a resistência ao escoamento tenha aumentado aproximadamente 30%, 40% e 59%, respectivamente para os aços de grau 65, 70 e

80, a capacidade última das vigas aumentou, no máximo, 27%, 36% e 49%, para vigas celulares submetidas a força concentrada no meio do vão. Para esta análise, foi tomado o aço grau 50 como referência. Esse comportamento também foi observado para os modelos submetidos a força uniformemente distribuída; a capacidade resistente aumentou, no máximo, 22%, 25% e 32%, respectivamente, para os aços de grau 65, 70 e 80.

O uso de aços de alta resistência se mostrou mais eficaz em vigas celulares com baixa esbeltez, nas quais a instabilidade local governou o modo de falha. Em contraste, o uso de aço de alta resistência em vigas celulares mais esbeltas, apresentou efetividade reduzida, uma vez que o aumento na capacidade resistente foi insignificante em relação ao aumento na resistência do aço. Além disso, para esses vãos mais longos, a sensibilidade do modelo ocasionalmente teve um papel mais crítico, com os estados limites de serviço (por exemplo, critérios de flecha como $L/180$) tornando-se predominantes na resposta estrutural.

Figura 7.19 – Influência da classe de aço na capacidade resistente de vigas celulares



(a) Força concentrada no meio do vão

(b) Força uniformemente distribuída

Fonte: Autor (2025)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusões

O presente estudo teve o objetivo de avaliar o comportamento de vigas celulares em aço de alta resistência. O processo metodológico envolveu duas etapas: Revisão Sistemática de Literatura e modelagem numérica no *software* ABAQUS. A RSL foi destinada a encontrar os principais estudos acerca do comportamento de vigas celulares em aços de alta resistência. Na etapa de modelagem numérica, foi apresentado todo o procedimento da construção e análise do modelo numérico no *software* ABAQUS, contemplando tanto a análise de estabilidade elástica, quanto a análise não linear física e geométrica, onde foram incorporadas as não linearidades física e geométrica, indicadas pelas tensões residuais e imperfeições iniciais, respectivamente.

A Revisão Sistemática de Literatura fundamentou o estado da arte de vigas celulares de aço, identificando os principais estudos acerca desta temática, os autores de maior relevância, a evolução de pesquisa ao longo do tempo e, os periódicos de maior destaque. Observou-se uma lacuna de conhecimento significativa a respeito do estudo do comportamento de vigas celulares em aço de alta resistência, a qual foi uma das motivações para a realização deste estudo.

Na modelagem numérica, a validação do modelo numérico foi realizada em duas etapas, utilizando dados disponíveis na literatura, contemplando modelos experimentais de vigas celulares em aço comum e vigas de alma cheia em aço de alta resistência. Esta subdivisão em etapas foi necessária devido à ausência de modelos experimentais de vigas celulares em aço de alta resistência. Primeiramente, foi realizada a calibração de 7 modelos numéricos de vigas celulares em aço comum, contemplando diferentes modos de falha, como plastificação devido ao mecanismo de Vierendeel, instabilidade no montante de alma por cisalhamento e instabilidade lateral com torção. A segunda etapa de validação concentrou-se na representação numérica de vigas de alma cheia em aço de alta resistência, com isso, abrangendo a validação de 9 modelos estruturais.

Posteriormente, foi conduzida uma análise de sensibilidade do modelo numérico frente às imperfeições físicas e geométricas, considerando que a literatura não apresenta modelos experimentais de vigas celulares em aço de alta resistência, tampouco um padrão de distribuição e intensidade de tensões residuais para este tipo de elemento estrutural.

Um estudo paramétrico foi então conduzido para examinar a influência de diferentes modelos de tensões residuais e amplitudes de imperfeições geométricas ($L/500$ e $L/1000$) no comportamento de estabilidade de vigas celulares em aço comum e vigas de alma cheia em aço de alta resistência. Os resultados indicaram que, para vigas celulares, o modelo ECCS (1984) apresentou previsões precisas, embora os modelos de Sonck (2014) e Galambos e Ketter (1959) também tenham demonstrado bom desempenho no que tange à representação do comportamento e capacidade resistente dos modelos numéricos de vigas celulares em aço comum. O modelo HEA340 de Boissonnade *et al.*, (2013) teve impacto significativo na variabilidade dos resultados. Além disso, uma maior amplitude de imperfeições geométricas iniciais ($L/500$) afetou notavelmente os modelos, levando a menores capacidades resistentes. O uso exclusivo da imperfeição $L/1000$ mostrou tendência à superestimação da capacidade resistente do modelo numérico, em comparação com o modelo experimental, ressaltando a importância da consideração de tensões residuais na modelagem numérica, bem como sua influência na capacidade resistente de vigas celulares em aço comum.

Em relação às vigas de alma cheia em aço de alta resistência, os resultados mostraram que o modelo de Schaper *et al.* (2022) apresentou concordância com os resultados experimentais, em alguns casos melhor do que os modelos numéricos que utilizaram as tensões residuais medidas por Xiong *et al.* (2021, 2022), revelando-se um padrão bastante eficaz para a previsão do comportamento de vigas de alma cheia em aço de alta resistência. O modelo de Young (1972) mostrou-se inadequado para vigas em aço de alta resistência, devido à grande divergência dos resultados e baixa correlação, especialmente para o modelo B450-1-4 de Xiong *et al.*, (2022), tornando-o o padrão de tensões residuais menos preciso entre os analisados. Os modelos numéricos que consideraram apenas imperfeições geométricas iniciais apresentaram as maiores variações, evidenciando a necessidade de incluir tensões residuais; embora a amplitude $L/500$ tenha apresentado melhor concordância, sua baixa correlação para o modelo B450-1-4 de Xiong *et al.*, (2022), com alta variação e resposta carga-deslocamento insatisfatória, indica que ela não é representativa.

Por fim, uma análise de sensibilidade foi conduzida para avaliar a influência dos aços de alta resistência no comportamento de vigas celulares. Esse estudo examinou o impacto de imperfeições geométricas e materiais em modelos numéricos submetidos à FLT. Os resultados indicaram que o impacto das tensões residuais diminui à medida que a resistência ao escoamento aumenta. O comportamento força-deslocamento tende a se aproximar para todos os modelos de tensões residuais à medida que a resistência do aço aumenta. O modelo de Sonck (2014) mostrou-se aplicável para vigas celulares em aço de alta resistência, uma vez que as

tensões residuais demonstraram menor influência na resistência à instabilidade desses modelos numéricos. Este estudo serviu de base para a definição adequada do modelo de tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial de modelos numéricos de vigas celulares em aço de alta resistência, fundamentando corretamente as imperfeições adotadas para a segunda etapa do estudo paramétrico.

Após a conclusão das análises de sensibilidade frente às imperfeições, foi realizado um estudo paramétrico com o objetivo de analisar as seguintes variações: condições de carregamento (força concentrada no meio do vão e força uniformemente distribuída), parâmetros geométricos (comprimento destravado, fator de expansão, diâmetro de abertura) e classe de aço. Foi possível observar que as mudanças nas condições de carregamento, geometria e classe de aço alteram a capacidade resistente das vigas celulares.

A resistência ao escoamento do aço influencia diretamente na capacidade resistente. Foi observado que quanto maior a classe de aço, maior a capacidade resistente do modelo e possível diminuição de modos de instabilidade local. No entanto, o uso de aços de alta resistência mostrou-se mais eficaz para vigas celulares menos esbeltas, onde modos de falha locais governaram a capacidade resistente. O aumento de capacidade resistente em vigas celulares mais esbeltas se mostrou pouco eficaz quando comparado ao ganho de resistência ao escoamento, por vezes, vigas celulares com comprimentos destravados elevados foram sujeitas à limitação por flecha excessiva, o que reduziu significativamente o impacto efetivo do uso de um material com maior resistência.

Nenhum modelo numérico apresentou falha por plastificação devido ao MV. Este resultado pode ser explicado pela adoção da largura do montante de alma fixada em $0.1h_0$, uma vez que as aberturas pouco espaçadas retornaram montantes de alma com elevada esbeltez, levando a ocorrência do fenômeno de instabilidade no montante de alma precedente a possível plastificação nos tês. Por outro lado, foi possível observar que as vigas celulares com os montantes de alma reduzidos, associados à condição de carregamento uniformemente distribuído e comprimentos destravados curtos, retornaram o modo de falha por instabilidade no montante de alma devido aos esforços de compressão. O montante de alma curto associado à elevada altura da seção transversal colapsou por compressão, analogamente a uma barra submetida à compressão simples. A condição de carregamento pode ter tido pouca influência, uma vez que as vigas celulares submetidas à força concentrada no meio do vão não sofreram FMAc. Isso possivelmente ocorreu em razão ao enrijecedor central imposto inicialmente para evitar instabilidades locais na mesa, mas que também pode ter contribuído para prevenir a ocorrência da FMAc.

8.2 Sugestão para futuros estudos

Com a realização do presente trabalho, foram identificadas lacunas que merecem ser investigadas em futuros estudos. Desta forma, com o intuito de dar continuidade ao estudo de vigas celulares em aço de alta resistência, são sugeridos os seguintes estudos:

- I. Analisar experimentalmente os efeitos da intensidade e distribuição de tensões residuais em vigas celulares de aço de alta resistência;
- II. Realizar programas experimentais com vigas celulares em aço de alta resistência, englobando diferentes modos de falha;
- III. Aprofundar o estudo do comportamento e capacidade resistente à FMAc e averiguar um procedimento de cálculo para verificação deste modo de falha;
- IV. Avaliar numericamente o efeito da largura do montante de alma em vigas celulares de aço de alta resistência;
- V. Verificar o comportamento de vigas celulares mistas de aço de alta resistência;
- VI. Estudar o comportamento da ligação do montante de alma de vigas celulares em aço comum e em aço de alta resistência, por meio de ligação com parafusos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIYAH, F.; KAMBALI, I.; SETIAWAN, A. F.; RADZI, Y. Md; RAHMAN, A. A. Utilization of steel slag from industrial waste for ionizing radiation shielding concrete: a systematic review. **Construction and Building Materials**, v. 382, p. 131360, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131360>.

ALMEIDA, S.J.C. **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais**. 206 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-22 - Specification for structural steel buildings**. Chicago, 2022.

ArcelorMittal. A913 High-Strength Steel. 2024. Disponível em: https://ami.arcelormittal.com/structural-shapes/A913_HighStrengthSteel/.

ArcelorMittal. Cellular Beams. ACB® 2020. Disponível em: <https://constructalia.arcelormittal.com/en/products/acb>.

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.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 4100: 2020 – Steel Structures**. Australia, 2020.

BALLIO, G.; MAZZOLANI, F. M. **Theory and design of steel structures**. Chapman and Hall. London, 1983.

BHAT, Rujuta A.; GUPTA, Laxmikant M.. Interaction of Buckling Modes for Cellular Steel Beams Under Flexure. **International Journal Of Steel Structures**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 260-273, 19 nov. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13296-020-00437-y>.

BOISSONNADE, N.; NSEIR, J.; LO, M.; SOMJA, H. Design of cellular beams against lateral torsional buckling. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Structures and Buildings**. v.167, p.436-444, 2013.

BOISSONNADE, Nicolas; NSEIR, Joanna; SOMJA, Hugues. Design of cellular steel beams subjected to lateral torsional buckling. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 197, p. 111604, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2024.111604>.

BRADFORD, Mark A. Distortional buckling of monosymmetric I-beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 123-136, jan. 1985. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0143-974x\(85\)90010-0](http://dx.doi.org/10.1016/0143-974x(85)90010-0).

CASTRO E SILVA, A., L., R. **Análise numérica não-linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à compressão uniaxial**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CHUNG, K.F; LIU, T.C.H; KO, A.C.H. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 57, n. 5, p. 467-490, maio 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-974x\(00\)00035-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-974x(00)00035-3).

DAS, P. K.; SRIMANI, S. L. **Handbook for the design of castellated beams**. New Delhi, Delhi, India: Oxford & IBH Publishing Company, 1984.

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA. **Abaqus 6.12**, Providence, RI, USA, 2012.

ECCS - European Convention for Constructional Steelwork. Ultimate Limit State Calculations of Sway Frames with Rigid Joints. No. 33, 1984.

EN 10025 2004 – Hot Rolled Products of Structural Steels. CEN - European Committee for Standardization, Belgium, 2004.

EUROCODE 3. EN 1993-1-1 2022 – Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN - European Committee for Standardization, Belgium, 2022.

EUROCODE 3. EN 1993-1-5 2024 – Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. CEN - European Committee for Standardization, Belgium, 2024.

EUROCODE 3. EN 1993-1-13 2024 – Design of steel structures. Parte 1-13: Beams with large web openings. CEN - European Committee for Standardization, Belgium, 2024.

EUROCODE 3. EN 1993-1-14 2024 – Design of steel structures. Parte 1-14: Design assisted by finite element analysis. CEN - European Committee for Standardization, Belgium, 2024.

ELLOBODY, Ehab. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 52, p. 66-79, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.009>.

ELKAWAS, A.A.; HASSANEIN, M.F.; ELCHALAKANI, Mohamed. Lateral-torsional buckling strength and behaviour of high-strength steel corrugated web girders for bridge construction. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 122, p. 112-123, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.021>.

ERDAL, Ferhat; DOĞAN, Erkan; SAKA, Mehmet Polat. Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 67, n. 2, p. 237-247, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.014>.

ERDAL, Ferhat; SAKA, Mehmet Polat. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 80, p. 355-368, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.007>.

ERDAL, Ferhat; TUNCA, Osman; TAŞ, Serkan. The comparative analysis of optimal designed web expanded beams via improved harmony search method. **Structural Engineering And Mechanics**, [S.L.], v. 54, n. 4, p. 665-691, 25 maio 2015. <http://dx.doi.org/10.12989/SEM.2015.54.4.665>.

EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPÄISCHE NORM. **EN 10025-6: Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition**. 2009.

FENG, Ran; ZHAN, Hongyong; MENG, Shangwei; ZHU, Jihua. Experiments on H-shaped high-strength steel beams with perforated web. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 177, p. 374-394, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.059>.

FARES, Sameer S.; COULSON, J. e; DINEHART, David W.; **AISC Steel Design Guide 31: Castellated and Cellular Beam Design**. 2016.

FERREIRA, Felipe Piana Vendramell. **Flambagem lateral com torção em vigas celulares de aço por meio da modificação da distribuição das tensões residuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

FERREIRA, F. P. V. **Capacidade resistente de vigas celulares mistas à instabilidade no montante de alma**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

FERREIRA, Felipe Piana Vendramell; MARTINS, Carlos Humberto; NARDIN, Silvana de. Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 172, p. 106182, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106182>.

FERREIRA, Felipe Piana Vendramell; SHAMASS, Rabee; LIMBACHIYA, Vireen; TSAVDARIDIS, Konstantinos Daniel; MARTINS, Carlos Humberto. Lateral–torsional buckling resistance prediction model for steel cellular beams generated by Artificial Neural Networks (ANN). **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 170, p. 108592, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2021.108592>.

GALAMBOS, T.V.; KETTER R.L. **Columns under combined bending and thrust**. Proc. ASCE, 85 (EM2), p. 1, (1959), also ASCE Trans. Vol. 126, Reprint No. 136 (61-22). Fritz Laboratory Reports.

GALAMBOS, T.V. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**. 4° Ed. Structural Stability Research Council. Wiley Interscience, New York, 1988.

GB 50017-2003. Code for design of steel structures. Ministry of Construction of the People's Republic of China. China Architecture & Building Press. Beijing, 2003.

GERDAU. Perfis estruturais gerdau. 2022. Disponível em: https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/?_ga=2.42799840.493885656.1710427329-1746716875.1682530783&_gl=1*1n13zij*_gcl_au*MTg5Njk3NTQzMzEwNDI3MzI5.

GOMES, Cristiane Amélia de Brito. **Resistência à compressão de perfis H laminados de abas paralelas**. 2006. 167 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

GRANT, Maria J.; BOOTH, Andrew. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information & Libraries Journal**, v. 26, n. 2, p. 91-108, 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>.

GRILO, L. F. **Formulação para determinação da força cortante resistente de flambagem do montante de alma em vigas celulares de aço**. 2018. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018.

HUBER, A. W.; BEEDLE, L. S. **Residual stress and the compressive strength of steel**. Welding Journal. 33 (12), p. 589-s, 1954. Reprint No. 96 (54-3), 1954. Fritz Laboratory Reports.

KANG, Lan; MENG, Liuchen; LIN, Yiwei. Experimental and numerical investigation of lateral torsional buckling behavior and capacity of welded Q460 beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 172, p. 106166, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106166>.

KERDAL, D. Lateral-Torsional Buckling Strength of Castellated Beams. University of Sheffield, 1982.

KERDAL, D.; NETHERCOT, D.A.. Failure modes for castellated beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 295-315, jan. 1984. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0143-974x\(84\)90004-x](http://dx.doi.org/10.1016/0143-974x(84)90004-x).

KHATRI, Ashish P.; KATIKALA, Sai Ram; KOTAPATI, Vijaya Krishna. Effect of load height on elastic buckling behavior of I-shaped cellular beams. **Structures**, [S.L.], v. 33, p. 1923-1935, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.047>.

LAW, K.H.; GARDNER, L.. Lateral instability of elliptical hollow section beams. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 37, p. 152-166, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.008>.

LAWSON, R. Mark; BASTA, Antoine. Deflection of C section beams with circular web openings. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 134, p. 277-290, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2018.10.010>.

LAWSON, R. Mark; BASTA, Antoine; UZZAMAN, Asraf. Design of stainless steel sections with circular openings in shear. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 112, p. 228-241, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.017>.

LAWSON, R. Mark; HICKS, S. J. **Design of Composite Beams with Large Web Openings** SCI P355. Steel Construction Institute. Berkshire, United Kingdom. 2011.

LE, Tuan; BRADFORD, Mark A.; LIU, Xinpei; VALIPOUR, Hamid R.. Buckling of welded high-strength steel I-beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 168, p. 105938, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105938>.

LE, Tuan; PARADOWSKA, Anna; BRADFORD, Mark A.; LIU, Xinpei; VALIPOUR, Hamid R.. Residual stresses in welded high-strength steel I-Beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 167, p. 105849, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105849>.

LI, Tian-Ji; LI, Guo-Qiang; WANG, Yan-Bo. Residual stress tests of welded Q690 high-strength steel box- and H-sections. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 115, p. 283-289, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.040>.

MENGIST, W.; SOROMESSA, T.; LEGESE, G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. **Methodsx**, v. 7, p. 100777, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D.G.; The PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**. v. 8, n. 5, p. 336-341, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007>.

PANEDPOJAMAN, Pattamad; THEPCHATRI, Thaksin; LIMKATANYU, Suchart. Novel simplified equations for Vierendeel design of beams with (elongated) circular openings. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 112, p. 10-21, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.007>.

PANEDPOJAMAN, Pattamad; THEPCHATRI, Thaksin; LIMKATANYU, Suchart. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 76, p. 92-104, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.007>.

PANEDPOJAMAN, Pattamad; SAE-LONG, Worathep; CHUB-UPPAKARN, Tanan. Cellular beam design for resistance to inelastic lateral–torsional buckling. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 99, p. 182-194, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.08.026>.

PAZIN, V. A.; FERREIRA, F. P. V.; DE NARDIN, S. Vigas celulares de aço: uma revisão sistemática de literatura. Em: I CBEM - Congresso Brasileiro de Estruturas Mistas, 2024, Maringá. Anais I Congresso Brasileiro de Estruturas Mistas. v. 1. p. 1-9.

REIS, A.; CAMOTIM, D. **Estabilidade estrutural** - McGraw-Hill; 2000.

SAYED-AHMED, E. Y. Lateral buckling of steel I-beams: a numerical investigation and proposed equivalent moment factor equations. **Al Azhar University Engineering Journal**. v.7, n.1, p.111-123, 2004.

SCHAPER, Lukas; TANKOVA, Trayana; SILVA, Luís Simões da; KNOBLOCH, Markus. A novel residual stress model for welded I-sections. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 188, p. 107017, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107017>.

SONCK, D.; BOISSONNADE, N.; VAN IMPE, R. Instabilities of cellular members loaded in bending or compression. Proceedings of the Annual Stability Conference. Structural Stability Research Council. Grapevine, Texas, 2012.

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; VANLAERE, W; VAN IMPE, R. Influence of plasticity on lateral–torsional buckling behaviour of cellular beams. **Materials Research Innovations**, [S.L.], p. 158-161, fev. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/143307511x12858956847958>.

SONCK, Delphine. **Global Buckling of Castellated and Cellular Steel Beams and Columns**. 2014. Tese de Doutorado. Ghent University, 2014.

SONCK, Delphine; BELIS, Jan. Lateral–torsional buckling resistance of cellular beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 105, p. 119-128, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.11.003>.

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**, [S.L.], v. 67, n. 6, p. 992-1000, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.01.009>.

SHAMASS, Rabee; GUARRACINO, Federico. Numerical and analytical analyses of high-strength steel cellular beams: a discerning approach. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 166, p. 105911, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105911>.

STANDARD ASSOCIATION OF AUSTRALIA/STANDARD ASSOCIATION OF NEW ZEALAND. **AS/NZS 3678 STRUCTURAL STEEL - HOT-ROLLED PLATES FLOORPLATES AND SLABS**. Sydney (Australia), 2016.

SZALAI, József; PAPP, Ferenc. A new residual stress distribution for hot-rolled I-shaped sections. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 61, n. 6, p. 845-861, jun. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.12.004>.

TANKOVA, Trayana; SILVA, Luís Simões da; RODRIGUES, Filipe. Buckling curve selection for HSS welded I-section members. **Thin-Walled Structures**, v. 177, p. 109430, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2022.109430>.

TANKOVA, Trayana; SILVA, Luís Simões da; BALAKRISHNAM, Marimuthu; RODRIGUES, Dulce; LAUNERT, Benjamin; PASTERNAK, Hartmut; TUN, Tin Yadanar. Residual stresses in welded I section steel members. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 197, p. 109398, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109398>.

TANKOVA, Trayana; RODRIGUES, Filipe; LEITÃO, Carlos; MARTINS, Cláudio; SILVA, Luís Simões da. Lateral-torsional buckling of high strength steel beams: experimental resistance. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 164, p. 107913, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2021.107913>.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. *Theory of Elastic Stability*. New York: McGraw-Hill, 1961.

TSAVDARIDIS, Konstantinos Daniel; D'MELLO, Cedric. 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.], v. 67, n. 10, p. 1605-1620, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004>.

TSAVDARIDIS, Konstantinos Daniel; D'MELLO, Cedric. Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes through Nonlinear Finite-Element Analyses. **Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 138, n. 10, p. 1214-1230, out. 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000562](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000562).

TSAVDARIDIS, Konstantinos Daniel; GALIATSATOS, Grigorios. Assessment of cellular beams with transverse stiffeners and closely spaced web openings. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 94, p. 636-650, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.05.005>.

VERWEIJ, J. G. Cellular Beam-Columns in Portal Frame Structures. Delft University of Technology, Nederland, 2010.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço**. 239p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

Visualizing scientific landscapes. **VOSviewer**. version 1.6.19. Leiden - Universiteit Leiden. 2023.

WANG, Xing-Qiang; TAO, Zhong; KATWAL, Utsab; HOU, Chao. Tensile stress-strain models for high strength steels. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 186, p. 106879, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106879>.

WARREN, J. **Ultimate load and deflection behaviour of cellular beams**. MSc thesis. School of Civil Engineering, Surveying and Construction. University of Natal, Durban, 2001.

WARD, J. K. **Design of Composite and Non-Composite Cellular Beams**. Silwood Park, Askot, UK. The Steel Construction Institute, 1990.

XIONG, Gang; FENG, Yong; LIAO, Xiao-Die; GU, Yu; KANG, Shao-Bo. Lateral-torsional buckling behaviour of welded Q690 steel I-beams with double lateral restraints along the length. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 170, p. 108659, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2021.108659>.

XIONG, Gang; FENG, Yong; PENG, Qi; KANG, Shao-Bo; ZHANG, Yue; FAN, Yi-Li. Lateral-torsional buckling behaviour of 690 MPa high strength steel beams. **Structures**, [S.L.], v. 33, p. 3999-4010, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.085>.

YAN, Xiao-Lei; LI, Guo-Qiang; WANG, Yan-Bo; JIANG, Jin. Experimental and numerical investigation on flexural-torsional buckling of Q460 steel beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 174, p. 106276, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106276>.

YOUNG, B.W., **Residual stresses in hot-rolled sections**. IABSE reports of the working commissions. Coll. On Column Strength, Paris, França, 1972.

YOUNG, B. W. Residual stresses in hot rolled members. **IABSE Colloquium On Column Strength**, p. 25-38. 1975.

YUN, Xiang; GARDNER, Leroy. Stress-strain curves for hot-rolled steels. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 133, p. 36-46, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>.

ZIRAKIAN, Tadeh; SHOWKATI, Hossein. Distortional buckling of castellated beams. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 62, n. 9, p. 863-871, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.01.004>.