

GABRIEL OLIVEIRA DE SOUSA

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO
EM VIGAS ANGELINAS**

UBERLÂNDIA-MG

2025

GABRIEL OLIVEIRA DE SOUSA

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO
EM VIGAS ANGELINAS**

Monografia apresentada a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi

UBERLÂNDIA-MG

2025

GABRIEL OLIVEIRA DE SOUSA

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO
EM VIGAS ANGELINAS**

Monografia apresentada a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Rossi – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Felipe Piana Vendramell Ferreira – Universidade Federal de Uberlândia

À Deus, pela minha vida e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos.

Aos meus pais, à minha família e aos meus amigos que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto me dedicava a este trabalho.

RESUMO

As vigas alveolares com aberturas sequenciais em padrão senoidal conhecidas comercialmente como vigas Angelina™ são produzidas pela ArcelorMittal. Essas vigas são elementos estruturais que apresentam elevada resistência à flexão devido à expansão da seção transversal, o que gera um aumento do momento de inércia entorno do eixo de flexão. Porém, devido ao aumento da esbeltez da alma, esses elementos são mais suscetíveis a diferentes modos de instabilidade. A elevada esbeltez da viga Angelina™ reduz a capacidade resistente à flambagem lateral com torção (FLT). A literatura apresenta poucos estudos relacionados aos modos de falha de uma viga alveolar com abertura em padrão senoidal. Logo, o presente trabalho busca analisar a flambagem lateral com torção em vigas Angelina™ a partir de uma investigação numérica no software comercial ABAQUS. Foram realizadas duas análises numéricas, a análise linear elástica realizada pelo método de perturbação linear *buckle* para a determinação do momento crítico elástico da viga e análise não linear inelástica para a determinação do momento último. Nessa última foram empregadas imperfeições iniciais, visto que no processo de fabricação das vigas, as mesmas adquirem algumas imperfeições. A partir dessa análise foi possível obter valores para os momentos críticos elásticos e últimos das vigas Angelinas™ analisadas. Os resultados foram comparados com procedimentos analíticos presentes na literatura verificando qual processo é mais adequado para determinação das propriedades geométricas da seção transversal das vigas. Em suma, foi possível realizar a verificação da abordagem de cálculo duplo T, visto que essa abordagem até então era empregada inicialmente para cálculo de vigas casteladas. e das demais abordagens analíticas para vigas Angelina™.

Palavras-chave: Flambagem lateral com torção, Abaqus, investigação numérica, Vigas alveolares com abertura senoidal.

ABSTRACT

Cellular beams with sequential openings in a sinusoidal pattern, commercially known as Angelina™ beams, are produced by ArcelorMittal. These beams are structural elements that exhibit high flexural strength due to the expansion of the cross-section, which increases the moment of inertia around the bending axis. However, due to the increased slenderness of the web, these elements are more susceptible to different modes of instability. The high slenderness of the Angelina™ beam reduces its resistance to lateral-torsional buckling (LTB). The literature presents few studies related to the failure modes of cellular beams with sinusoidal openings. Therefore, this study aims to analyze the lateral-torsional buckling of Angelina™ beams through a numerical investigation using the commercial software ABAQUS. Two numerical analyses were performed: a linear elastic analysis using the linear perturbation buckle method to determine the elastic critical moment of the beam, and a nonlinear inelastic analysis to determine the ultimate moment. In the latter, initial imperfections were incorporated, as the manufacturing process of the beams introduces certain imperfections. From this analysis, values for the elastic critical moments and ultimate moments of the analyzed Angelina™ beams were obtained. The results were compared with analytical procedures found in the literature to determine which process is more suitable for determining the geometric properties of the beam's cross-section. In summary, it was possible to verify the applicability of the double-T calculation approach, which was initially employed for castellated beams, and other analytical approaches for Angelina™ beams.

Keywords: Lateral Torsional Buckling, Abaqus, Numerical Investigation, Angelina™.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Padrões geométricos de perfis alveolares	11
Figura 1.2 – Disposição de tubulações nas aberturas da viga	12
Figura 1.3 – Processo de fabricação da viga com abertura senoidal	13
Figura 1.4 – FLT em uma viga com abertura senoidal.....	14
Figura 2.1 – Abordagem duplo T	16
Figura 2.2 – Modelo de tensões residuais proposto por Sonck	22
Figura 3.1 – Modelo Tensão-Deformação proposto por Earls	23
Figura 3.2 – Malha livre empregada no modelo numérico	24
Figura 3.3 – Condições de contorno empregadas no modelo numérico.....	24
Figura 3.4 – Esquema do experimento conduzido por Durif, Bouchair e Vassart (2013)	25
Figura 3.5 – Esquema das dimensões de uma viga Angelina™.....	26
Figura 3.6 – Curva carga x deslocamento	27
Figura 3.7 – Configuração dos carregamentos utilizados nas análises	28
Figura 3.8 – Fluxograma dos modelos numéricos analisados	28
Figura 4.1 – Momento crítico elástico: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – ABNT NBR 8800:2024	29
Figura 4.2 – Momento crítico elástico: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – EUROCODE 3	31
Figura 4.3 – Curvas carga-deslocamento para a viga IPE 220 (6m) para carga concentrada no meio do vão e cargas distribuídas	33
Figura 4.4 – Vigas na condição indeformada-deformada na análise não linear elástica	34
Figura 4.5 – Momento resistente: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – ABNT NBR 8800:2024	35
Figura 4.6 – Momento resistente: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – EUROCODE 3	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores das constantes C_1 e C_2 em função do tipo de carregamento aplicado	19
Tabela 3.1 – Dimensões da viga Angelina™ ensaiada	26

LISTA DE SÍMBOLOS

M_{cr} : Momento crítico elástico;

L_b : Comprimento destravado da viga;

E : Módulo de elasticidade longitudinal;

I_y : Momento de inércia no eixo de menor inércia;

G : Módulo de elasticidade transversal;

J : Constante de torção;

C_w : Constante de empenamento;

C_b : Coeficiente de distribuição de momento fletor não uniforme;

M_{max} : Valor absoluto do momento máximo no seguimento destravado da viga;

M_A : Valor do momento localizado a $\frac{1}{4}$ do seguimento destravado da viga;

M_B : Valor do momento localizado a $\frac{3}{4}$ do seguimento destravado da viga;

M_C : Valor do momento localizado no ponto médio do seguimento destravado da viga;

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo;

M_{pl} : Momento fletor de plastificação da seção transversal;

γ_{al} : Coeficiente de minoração da resistência;

λ_p : Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r : Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

Z_x : Módulo de plastificação da seção transversal;

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo;

χ_{LT} : Fator de redução para flambagem lateral com torção;

Z_x : Módulo de plastificação da seção transversal;

f_y : Tensão de escoamento do aço;

γ_{M1} : Coeficiente de minoração da resistência;

ϕ_{LT} : Fator de imperfeição;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVO GERAL	15
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS ALVEOLARES.....	15
2.2 MOMENTO CRÍTICO BÁSICO.....	17
2.2.1 NORMA ABNT NBR 8800:2024.....	18
2.2.2 NORMA EUROCODE 3	18
2.3 MOMENTO ÚLTIMO	19
2.3.1 NORMA ABNT NBR 8800:2024.....	19
2.3.2 NORMA EUROCODE 3	20
2.4 IMPERFEIÇÕES INICIAIS.....	21
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO	22
3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	25
3.3 ESTUDO PARAMÉTRICO	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 MOMENTO CRÍTICO ELÁSTICO.....	28
4.2 MOMENTO ÚLTIMO	32
5 CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

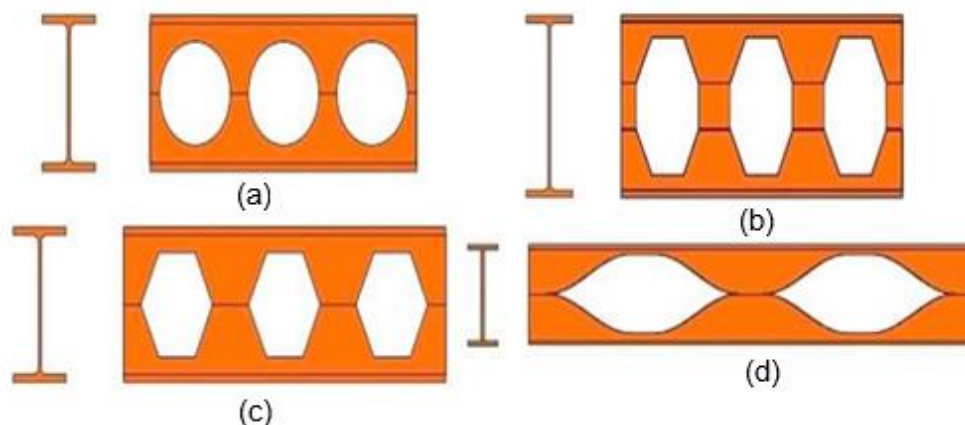
1 INTRODUÇÃO

As vigas de aço representam membros estruturais em forma de barras, frequentemente dispostas de maneira horizontal, que suportam cargas aplicadas perpendicularmente ao longo de sua extensão principal. Em função dessa configuração, na maioria dos casos estão sujeitas ao fenômeno da flexão simples, devido ao momento fletor e força cortante.

Existem vários modelos de vigas de aço, como as vigas alveolares de aço, essas são elementos estruturais na forma de barra com aberturas na alma, sujeitas a cargas transversais em seu eixo longitudinal, geralmente posicionadas de forma horizontal nas construções.

De acordo com a literatura, as vigas alveolares surgiram no século XX, devido à necessidade de perfis I laminados com alturas maiores do que os já produzidos na época. As vigas alveolares são classificadas de acordo com sua geometria. Existem diferentes tipos de vigas alveolares disponíveis no mercado como as vigas celulares (Figura 1.1a), com abertura no formato circular, as vigas com chapa expansora na alma (Figura 1.1b) e as vigas casteladas (Figura 1.1c). Recentemente surgiu um novo padrão de viga alveolar, que é a viga alveolar com abertura na alma em padrão senoidal conhecida comercialmente como Angelina™ e fabricada pela ArcelorMittal (Figura 1.1d). Esse surgimento de novas vigas se dá com o avanço dos meios de produção e mediante às exigências do mercado (DURIF; BOUCHAÏR, 2012).

Figura 1.1 - Padrões geométricos de perfis alveolares.



Fonte: Adaptado de MARTINHO (2014).

As vigas alveolares não são muito utilizadas no Brasil, por outro lado nos países desenvolvidos as mesmas são amplamente utilizadas devido a inúmeros fatores, como facilidade para a disposição das tubulações de construções e vencimento de grandes vãos (Figura 1.2).

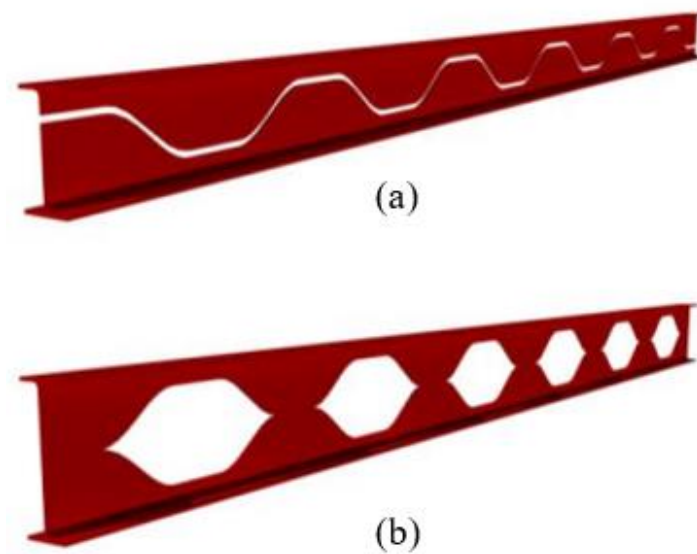
Figura 1.2 – Disposição de tubulações nas aberturas da viga.



Fonte: Adaptado de CARVALHO, A. S, et al. (2022).

As vigas de aço com abertura senoidal na alma conhecidas como vigas AngelinaTM são formadas a partir de um perfil I laminado, onde no mesmo é realizado um corte longitudinal em formato de senoide, após esse procedimento são obtidos dois perfis T (Figura 1.3a) que posteriormente são deslocados e soldados dando origem à viga alveolar com padrão de abertura senoidal (Figura 1.3b). Esse processo de fabricação confere ao perfil da viga uma altura superior em mais de 50% em relação ao perfil metálico I que a originou. Nas demais vigas alveolares a altura da alma pode superar a altura do perfil de alma cheia em 40 a 60%, resultando em um uso mais econômico de material quando a viga for submetida a um carregamento (Sonk e Belis, 2015). Essa maior altura da viga alveolar irá conferir à mesma um aumento do momento de inércia. Logo, a rigidez e a resistência à flexão da viga celular também irão aumentar, por outro lado as aberturas sequenciais elevam a esbeltez que a viga possui, ou seja, a capacidade resistente da viga a certas condições de carregamento tende a reduzir, ocasionando fenômenos como a flambagem lateral com torção (FLT), entre outros.

Figura 1.3 – Processo de fabricação da viga com abertura senoidal.

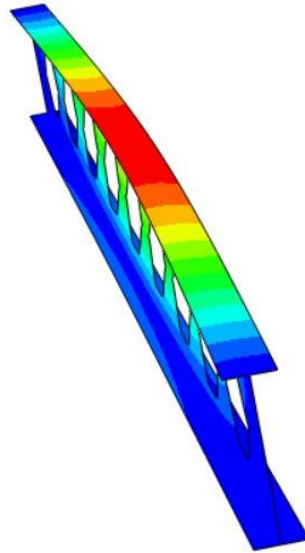


Fonte: Adaptado de CARVALHO, A. S, et al. (2022).

Autores como: Carvalho, A. S.; Rossi, A.; Martins, C. H. (2022), Rossi et al. (2020a), Chung, Liu e Ko (2000), Radic e Markulak (2007), Ellobody (2010), Abreu, Fakury e Castro e Silva (2010), NSEIR et al. (2012), realizaram vários estudos acerca dos modos de colapsos causados pelo aumento da seção transversal das vigas alveolares como flambagem lateral com torção, flambagem no montante de alma e mecanismo de vierendeel. Entretanto, ainda há poucos trabalhos à cerca da flambagem lateral com torção de vigas alveolares com padrão senoidal na literatura.

Segundo Rossi et al. (2020a), a flambagem lateral com torção (FLT) é o fenômeno em que a viga perde o equilíbrio no plano de flexão principal. A (Figura 1.4) mostra o fenômeno da FLT.

Figura 1.4 – FLT em uma viga com abertura senoidal.



Fonte: Autor (2025).

1.1 JUSTIFICATIVA

A Flambagem Lateral com Torção é um fenômeno que não foi totalmente estudado em vigas com aberturas na alma em padrão senoidal, por esse motivo a literatura é carente de procedimentos normativos para vigas alveolares e principalmente para o tipo de viga proposto neste trabalho. Nesse contexto, verifica-se a necessidade do desenvolvimento de maiores investigações para analisar o seu comportamento de forma global.

Além disso, vigas alveolares são vantajosas e se tornam viáveis economicamente, pois, possuem uma ótima relação resistência/peso e são capazes de vencer grandes vãos, onde os custos adicionais de corte e soldagem são compensados pelo ganho de momento de inércia gerado. Estes fatos corroboram para a necessidade de se estudar o fenômeno da Flambagem Lateral com Torção em vigas alveolares com abertura em padrão senoidal na alma, visto que a seção final ao ser analisada como um todo apresenta maior esbeltez e consequentemente torna-se mais suscetível a este modo de falha (NSEIR et al., 2012).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente projeto é investigar o comportamento à flambagem lateral com torção em vigas com aberturas em padrão senoidal.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir da investigação da flambagem lateral com torção em vigas alveolares com abertura senoidal por meio do desenvolvimento de simulações numéricas e métodos de cálculo, foi buscado a determinação do momento crítico básico e do momento último. Posteriormente, os valores numéricos obtidos foram comparados com os procedimentos analíticos normativos da ABNT NBR 8800:2024 e do EUROCODE 3 (procedimento de TARAS E GREINER, 2010) a fim de determinar a carga última da estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS ALVEOLARES

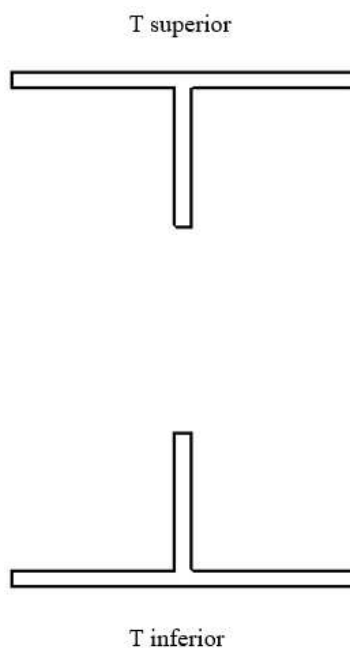
A partir desse tópico a Flambagem lateral com torção será descrita como FLT. Há diversos estudos acerca de modos de falha em vigas alveolares, principalmente nas vigas celulares e casteladas, todas essas pesquisas buscam identificar os modos de falha das vigas como a FLT. Em um trabalho conduzido por Ellobody (2010), foi realizada uma investigação acerca de vigas com aberturas hexagonais, mais conhecidas como vigas casteladas, as quais foram expostas a cargas e arranjos que provocassem falha por FLT. Segundo Ellobody (2010), a capacidade de carga prevista para vigas casteladas que apresentam modo de falha à FLT quando comparadas com normas internacionais apresentam resultados conservadores, entretanto, uma pequena parcela dessas vigas apresentou resultados não conservadores. Radic e Markulak (2007) também conduziram um estudo em que desenvolveram várias representações numéricas, visando investigar os mecanismos de colapso relacionados à FLT em vigas alveolares. Nessa pesquisa, dois fatores variáveis foram manipulados: o número de aberturas ao longo do vão e a largura das mesmas. Os autores compararam os resultados obtidos com os resultados do método proposto no EC-3 (EUROCODE-3). Os resultados apresentaram

baixa discrepância, chegando à conclusão de que os métodos propostos pelo EC-3 são aplicáveis.

Assim como Ellobody (2010) e Radic e Markulak (2007), Kerdal e Nethercot (1984) também conduziram estudos acerca da FLT em vigas alveolares. Kerdal e Nethercot (1984), realizaram pesquisas em vigas casteladas onde chegaram à conclusão que o comportamento da FLT nas vigas casteladas é semelhante ao comportamento nas vigas de aço de alma cheia, dando a possibilidade da aplicação de processos normativos para vigas de alma cheia em vigas alveolares. Essa aplicação é dada através da abordagem duplo T.

Sonk e Belis (2015) analisaram o comportamento da FLT em vigas celulares. Para isso utilizaram de duas abordagens de cálculo existentes, a primeira abordagem chamada de T reduz a flambagem lateral com torção em flexão lateral do T comprimido da viga, essa abordagem negligencia a parte tensionada, logo a mesma é de caráter bastante conservador. A segunda abordagem chamada de 2T ou duplo T (Figura 2.1), possibilita calcular a resistência à FLT com a mesma metodologia aplicada às vigas de alma cheia. Essa abordagem pode ser considerada no cálculo da FLT, porém nesse procedimento segundo os autores as tensões residuais oriundas do processo de fabricação dessas vigas não são levadas em consideração, logo devem ser inseridas para a aplicação do método.

Figura 2.1 – Abordagem duplo T.



Fonte: Autor (2025).

Ferreira, Rossi e Martins (2019), também pesquisaram a FLT em vigas celulares, os autores utilizaram abordagem duplo T e obtiveram resultados semelhantes aos de Sonk e Belis

(2015) e concluíram que dependendo do comprimento da viga analisada essa abordagem poderia resultar em valores para o momento último contra a segurança.

2.2 MOMENTO CRÍTICO BÁSICO

O momento crítico elástico desempenha um papel essencial na avaliação da capacidade de carga de estruturas de aço submetidas à FLT. O método de cálculo do momento crítico elástico foi proposto por Timoshenko e Gere (1961), sendo baseado na hipótese da aplicação de um momento constante nas extremidades da viga, e na aplicação de condições de apoio nas extremidades, assumindo que as extremidades da viga estão restringidas horizontalmente e verticalmente, não podendo girar em torno do eixo e sendo impossibilitada a distorção na seção transversal durante a flambagem. Ainda, segundo o autor o momento crítico não depende da rigidez à flexão da viga no plano vertical, visto que as deflexões no plano vertical são pequenas. Além disso, juntando o procedimento de cálculo do momento crítico com a utilização da abordagem de cálculo duplo T para a determinação das propriedades geométricas é possível realizar o dimensionamento de vigas alveolares.

De modo geral a solução clássica para o momento crítico elástico determina algumas premissas básicas para sua aplicação: material com comportamento isotrópico, elástico e homogêneo; vínculo de garfo (viga simplesmente apoiada, com giro da seção transversal impedido nos apoios); seções duplamente simétricas; e estrutura sujeita a momento fletor constante (Carvalho, A. S, et al 2022). Com isto tem-se a solução apresentada por meio da Equação 1.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_b}\right)^2 \frac{EC_w}{GJ}} \quad (1)$$

M_{cr} : Momento crítico elástico;

L_b : Comprimento destravado da viga;

E : Módulo de elasticidade longitudinal;

I_y : Momento de inércia no eixo de menor inércia;

G : Módulo de elasticidade transversal;

J : Constante de torção;

C_w : Constante de empenamento;

2.2.1 NORMA ABNT NBR 8800:2024

A versão atual da ABNT NBR 8800:2024, apresenta em seu texto no “Anexo D – Item D.2.8-a” uma formulação para determinação do momento crítico de vigas de alma cheia. A expressão é dada pela equação 2.

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (2)$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (3)$$

M_{max} : Valor absoluto do momento máximo no seguimento destravado da viga;

M_A : Valor do momento localizado a $\frac{1}{4}$ do seguimento destravado da viga;

M_B : Valor do momento localizado a $\frac{3}{4}$ do seguimento destravado da viga;

M_C : Valor do momento localizado no ponto médio do seguimento destravado da viga;

As variáveis da expressão são as mesmas do momento crítico proposto por Timoshenko e Gere (1961), com exceção da variável C_b que é referente ao coeficiente de distribuição de momento fletor não uniforme. O cálculo da variável C_b é dado pela equação 3.

2.2.2 NORMA EUROCODE 3

A versão atual do EUROCODE 3, apresenta em seu catálogo uma formulação para determinação do momento resistente de vigas, porém, não traz em seu catálogo uma expressão para cálculo do momento crítico básico. Entretanto em suas versões anteriores como o EN

1993-1-1:2002 é possível encontrar procedimentos de cálculo do momento crítico básico levando em conta as restrições laterais como a expressão dada pela equação 4.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_y}{L_b^2} \left[\sqrt{\frac{C_w}{I_y} + \frac{L_b^2 GJ}{\pi^2 EI_y}} + (C_2 y_g)^2 - C_2 y_g \right] \quad (4)$$

As variáveis da expressão são as mesmas do momento crítico proposto por Timoshenko (2009), salvo a variável y_g que representa a distância do ponto de aplicação da carga até o centro de cisalhamento da viga, e as constantes C_1 e C_2 que dependem da configuração do carregamento. A tabela 2.1 apresenta valores referentes às constantes C_1 e C_2 .

Tabela 2.1 – Valores das constantes C_1 e C_2 em função do tipo de carregamento aplicado.

CONSTANTE/TIPO DE CARREGAMENTO	CARREGAMENTO CONCENTRADO	CARREGAMENTO DISTRIBUÍDO
C_1	1,365	1,132
C_2	0,553	0,459

Fonte: Autor (2025).

2.3 MOMENTO ÚLTIMO

2.3.1 NORMA ABNT NBR 8800:2024

A norma ABNT NBR 8800:2024, traz consigo no “Anexo D – Item D.2.1” procedimentos para determinação do momento resistente de vigas de alma cheia. O procedimento de cálculo do momento resistente é dado de acordo com condições relacionadas aos parâmetros de esbeltez da viga conforme as equações 5, 6 e 7.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (5)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{al}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (6)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{al}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (7)$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (8)$$

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo;

M_{pl} : Momento fletor de plastificação da seção transversal;

γ_{al} : Coeficiente de minoração da resistência;

λ_p : Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r : Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

Z_x : Módulo de plastificação da seção transversal;

2.3.2 NORMA EUROCODE 3

O EUROCODE 3 apresenta uma expressão de cálculo para determinação do momento resistente de vigas sem restrições laterais dado pela equação 9.

$$M_{Rd} = \chi_{LT} Z_x \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (9)$$

As equações 10, 11 e 12 detalham os procedimentos de cálculo dos parâmetros utilizados para o cálculo do momento resistente, salvo o parâmetro α_{LT} , visto que o mesmo representa um fator de imperfeição e deve ser definido com base na curva de flambagem para a seção considerada.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \leq 1.0 \quad (10)$$

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0.2) + \lambda_{LT}^2] \quad (11)$$

$$\lambda_{LT} = \frac{Z_x f_y}{M_{cr}} \quad (12)$$

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo;

χ_{LT} : Fator de redução para flambagem lateral com torção;

Z_x : Módulo de plastificação da seção transversal;

f_y : Tensão de escoamento do aço;

γ_{M1} : Coeficiente de minoração da resistência;

ϕ_{LT} : Fator de imperfeição;

M_{cr} : Momento crítico elástico;

2.4 IMPERFEIÇÕES INICIAIS

A primeira análise realizada é a análise de perturbação linear do tipo *buckle* para estimar a carga crítica de flambagem e posteriormente estimar o momento crítico elástico. Nesse aspecto, não são consideradas nenhuma imperfeição nas vigas analisadas. Logo, a carga obtida não coincide totalmente com a carga real da estrutura quando ela está prestes a colapsar. Devido a isso, é de suma importância a aplicação de tensões residuais (imperfeições físicas) e imperfeições geométricas nas vigas para que a análise numérica coincida com os ensaios experimentais.

As imperfeições geométricas estão presentes tanto em perfis laminados quanto em perfis soldados e retratam possíveis irregularidades geométricas das vigas após a fabricação das mesmas. As tensões residuais, semelhantemente às imperfeições geométricas também estão presentes em perfis laminados e soldados, por outro lado, as mesmas podem levar ao surgimento precoce de modos de instabilidade ou ao escoamento prematuro. Logo, são responsáveis pela diminuição da capacidade de resistente de carga da viga (J. Szalai, F. Papp, 2004). Em relação à origem, as mesmas surgem nas vigas quando elas ainda não estão carregadas, são oriundas dos processos de fabricação das vigas. Além disso, as tensões residuais podem ter um impacto significativo na estabilidade dos membros estruturais. Em relação aos elementos estruturais de vigas em perfis I, as tensões podem impactar a resistência à FLT particularmente na fase inelástica.

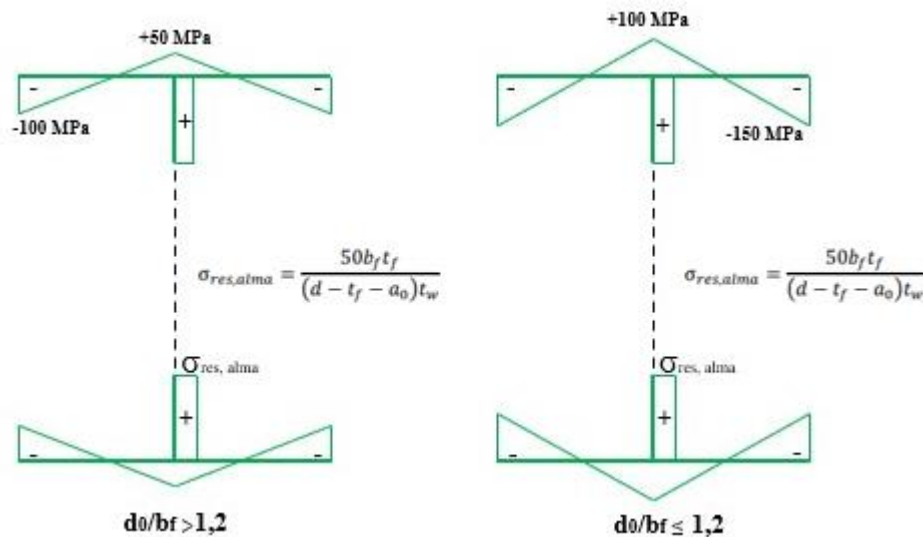
A configuração das tensões residuais é única para cada tipo de seção I. Outrossim, a situação ideal para uma modelagem numérica correta consiste em realizar medições de tensões

residuais, porém, a realização dessas medições é um processo inviável, visto que gera perda de tempo e recurso. Logo, para estudos numéricos a adoção de modelos de distribuição de tensões se torna recomendada (Rossi, et al 2021).

A implementação das imperfeições iniciais no software ABAQUS foi realizada através dos seguintes comandos, “IMPERFECTION”, “INITIAL CONDITION” E “TYPE=STRESS”.

Para validação do modelo numérico e consequente realização das análises foi utilizada para imperfeições geométricas a relação $L/1000$, onde L é o comprimento total da viga. Se tratando de tensões residuais não há estudos que implementaram as mesmas em vigas com abertura senoidal na alma, entretanto há estudos que as implementaram em vigas alveolares, como é o caso de abordado por Sonk, Van Impe e Belis (2014). Os autores desenvolveram um modelo de tensões residuais proposto especificamente para perfis alveolares com modo de fabricação padrão, ou seja, a partir de um corte único e soldado logo em seguida. Esse modelo proposto pelos autores está representando na figura 2.2. É possível perceber que a tensão atuante na alma é constante, e as tensões atuantes nas mesas são distribuídas linearmente.

Figura 2.2 – Modelo de tensões residuais proposto por Sonck. (Valores em mPa)



Fonte: Autor (2025).

3 METODOLOGIA

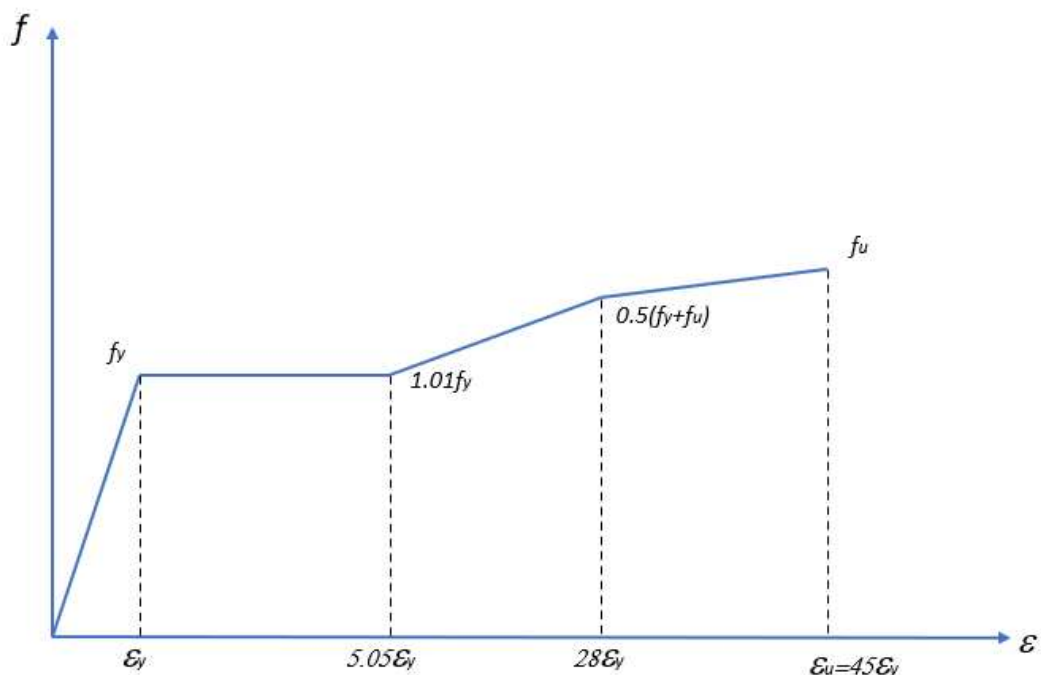
3.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO

A investigação numérica se deu por meio da modelagem numérica com o software comercial ABAQUS. Na análise numérica foram realizadas análises lineares e análises não

lineares físico-geométricas. Essas análises se deram por meio do método de perturbação linear *buckle* para estimar o momento crítico elástico e do método de Ricks para estimar o momento último.

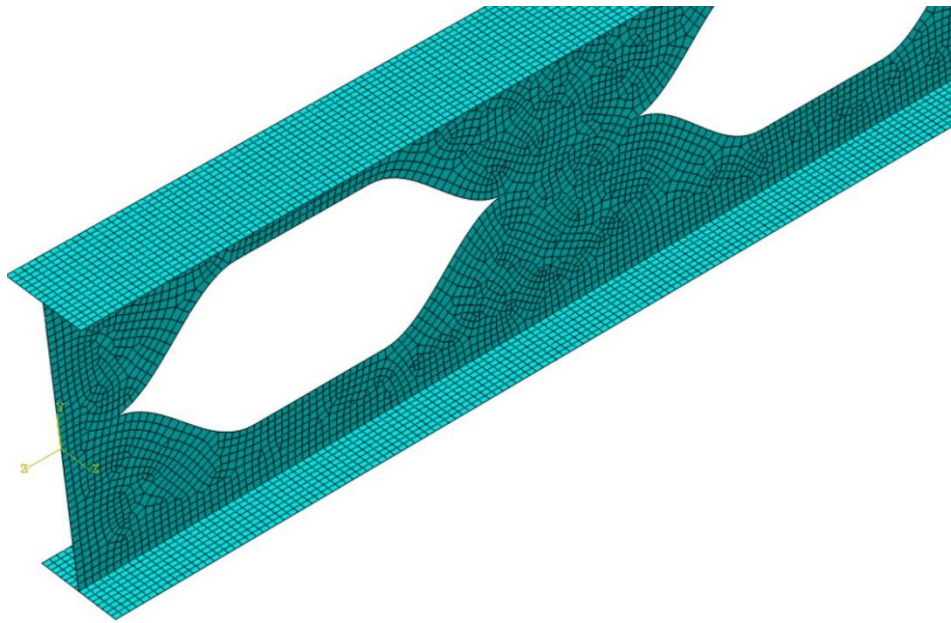
Além disso, foi utilizado na elaboração do modelo numérico o aço S355 com módulo de elasticidade de 200 MPa, tensão de escoamento de 355 MPa e tensão última de 490 MPa, para isso foi empregado o modelo constitutivo do aço de Earls (EARLS, 1999a, 1999b) (Figura 3.1). Segundo Rossi et al, 2021b, a relação tensão deformação do modelo constitutivo proposto por Earls é um modelo elastoplástico perfeito que leva em consideração o encruamento do aço por meio de regiões tri-lineares. A malha empregada na modelagem numérica foi escolhida baseada nos estudos de Ferreira, Rossi e Martins (2019) e Carvalho, A. S, et al 2022. A malha utilizada na modelagem numérica foi do tipo *shell* (elementos com casca). Os elementos empregados foram o S3 e S4R com tamanho de 10 mm com seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações (Figura 3.2).

Figura 3.1 – Modelo Tensão-Deformação proposto por Earls.



Fonte: Autor (2025).

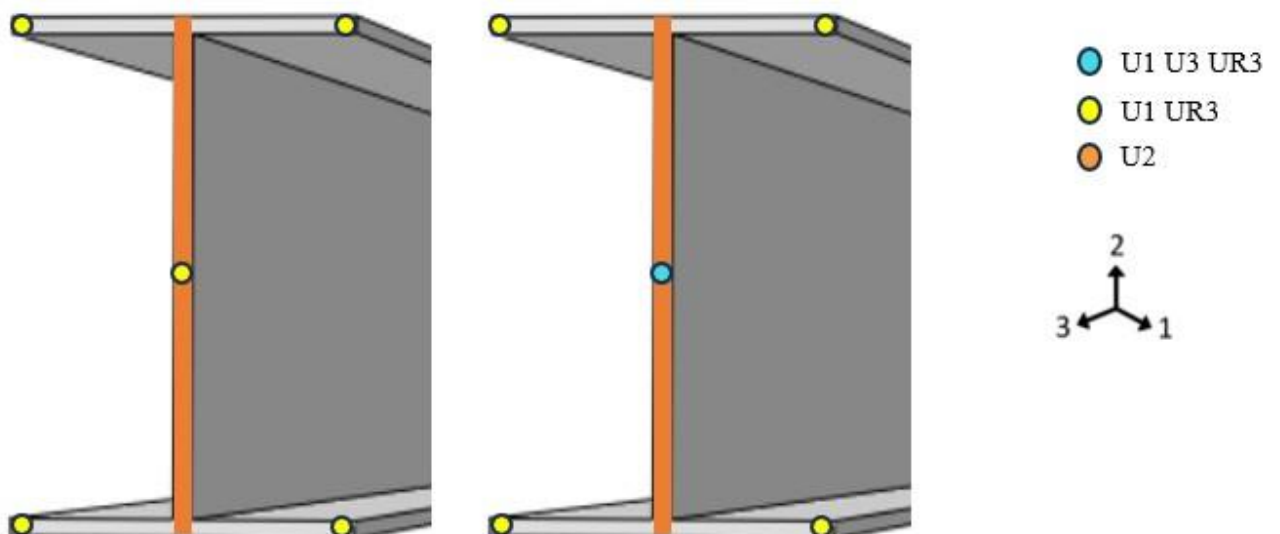
Figura 3.2 – Malha livre empregada no modelo numérico.



Fonte: Autor (2025).

As condições de contorno empregadas nas análises simulam uma condição de vínculo de garfo (Figura 3.3), onde foram restritos o deslocamento vertical da alma em ambos os lados da viga, deslocamento horizontal e rotação longitudinal nas extremidades das mesas e no ponto médio da alma, deslocamento horizontal, longitudinal e rotação longitudinal no ponto médio da altura da viga em um dos lados.

Figura 3.3 – Condições de contorno empregadas no modelo numérico.

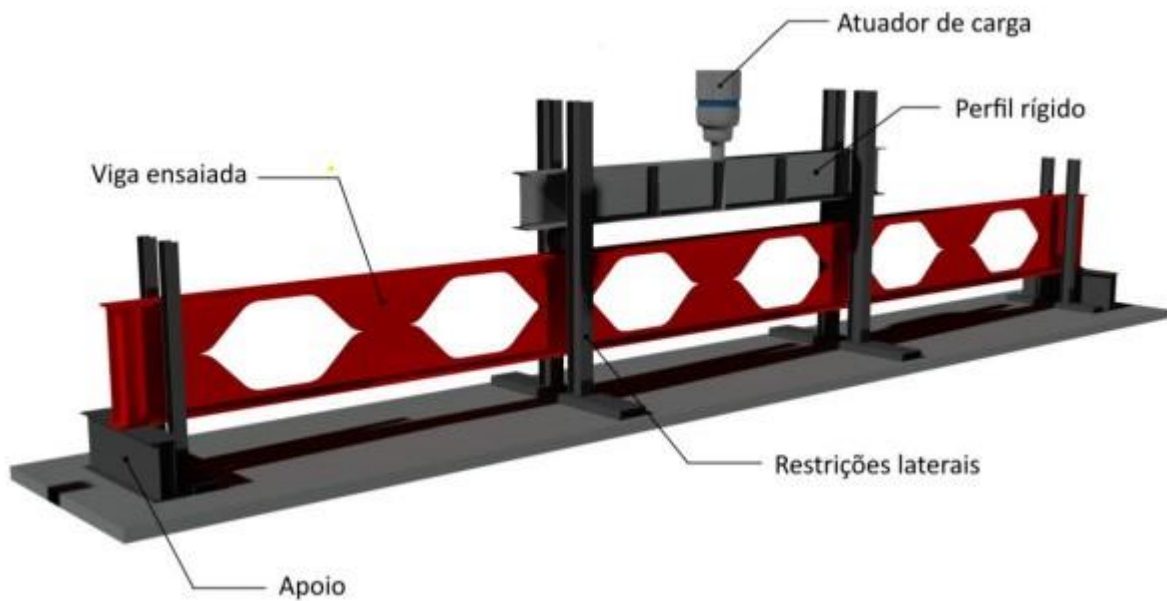


Fonte: Autor (2025).

3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

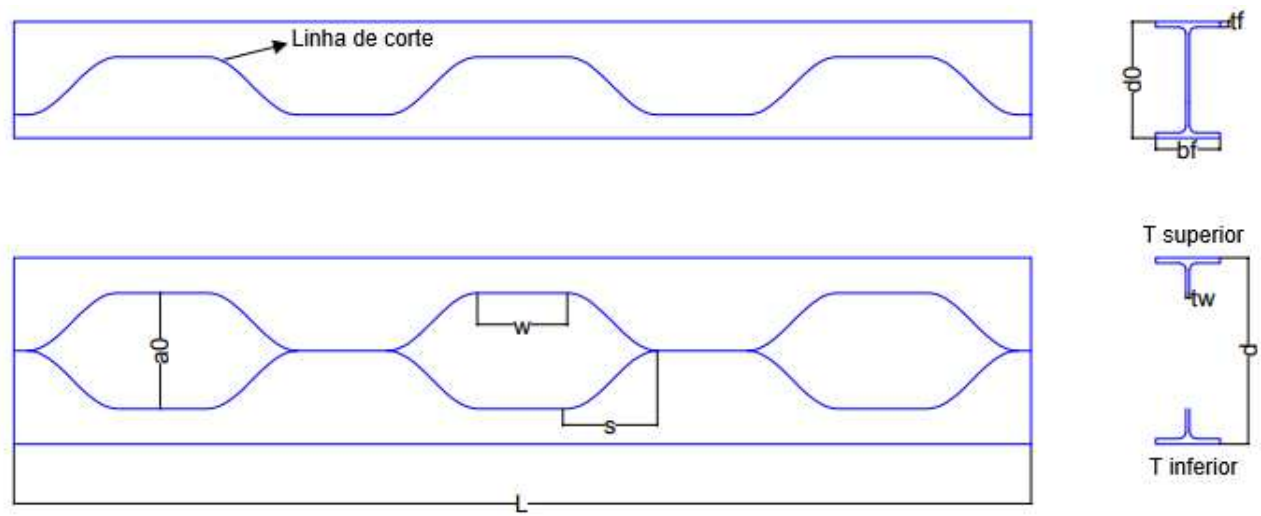
Para efeito de eficiência e no intuito de comprovar que o modelo numérico empregado é válido, foi escolhido um ensaio experimental em viga com abertura no padrão senoidal contido na literatura. O experimento escolhido foi realizado por Durif, Bouchair e Vassart (2013). A viga ensaiada será nomeada de DBV. A partir do experimento escolhido foram realizadas simulações no software comercial ABAQUS. A figura 3.4 mostra o esquema experimental realizado pelos autores em laboratório e a figura 3.5 o esquema das dimensões da viga ensaiada. Os valores das dimensões da viga ensaiada estão expostos na tabela 3.1.

Figura 3.4 – Esquema do experimento conduzido por Durif, Bouchair e Vassart (2013)



Fonte: CARVALHO, A. S, et al (2022).

Figura 3.5 – Esquema das dimensões de uma viga Angelina™.



Fonte: Autor (2025).

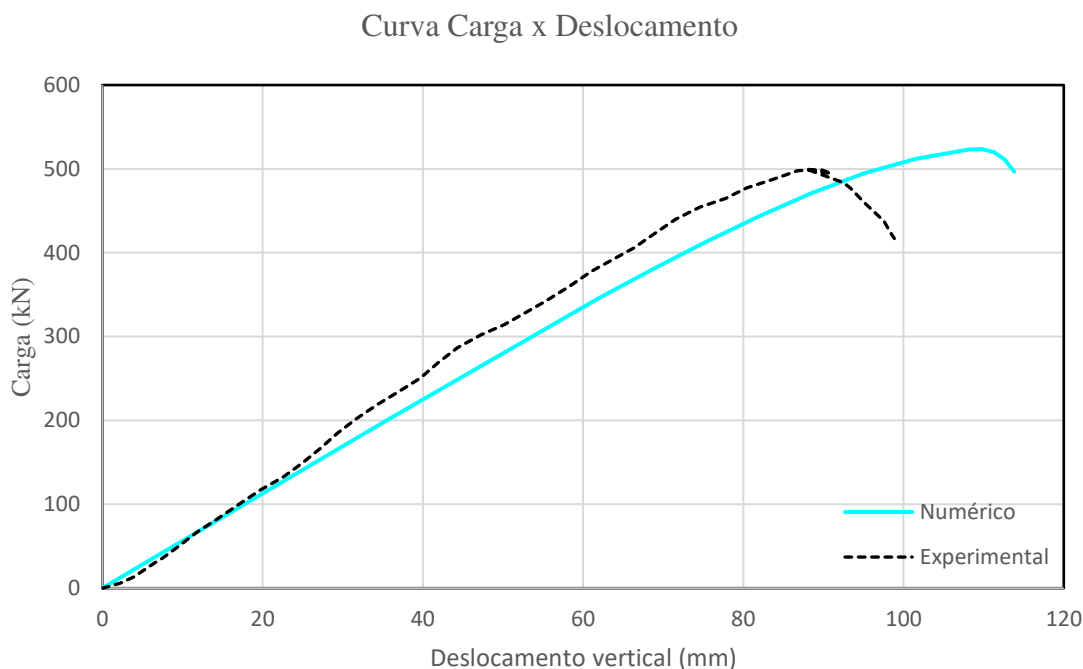
Tabela 3.1 – Dimensões da viga Angelina™ ensaiada.

Viga	L (mm)	a0 (mm)	s (mm)	w (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	d (mm)	fy (MPa)	fu (MPa)
DBV	10778	450	638	205	190	14.6	9.4	675	499	624

Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais dos autores. A figura 3.6 mostra o comparativo entre o ensaio numérico e o ensaio experimental.

Figura 3.6 – Curva carga x deslocamento.



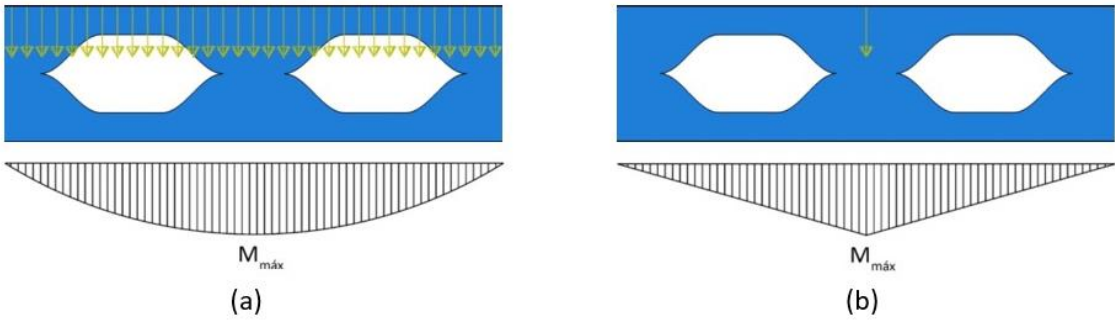
Fonte: Autor (2025).

Analisando os resultados do gráfico acima, percebe-se que os valores obtidos numericamente e experimentalmente estão razoavelmente próximos, com diferença de 4,7% da carga última e 13,13% do deslocamento do ensaio numérico em relação ao ensaio experimental caracterizando uma baixa variação e confirmando assim a validação do modelo empregado.

3.3 ESTUDO PARAMÉTRICO

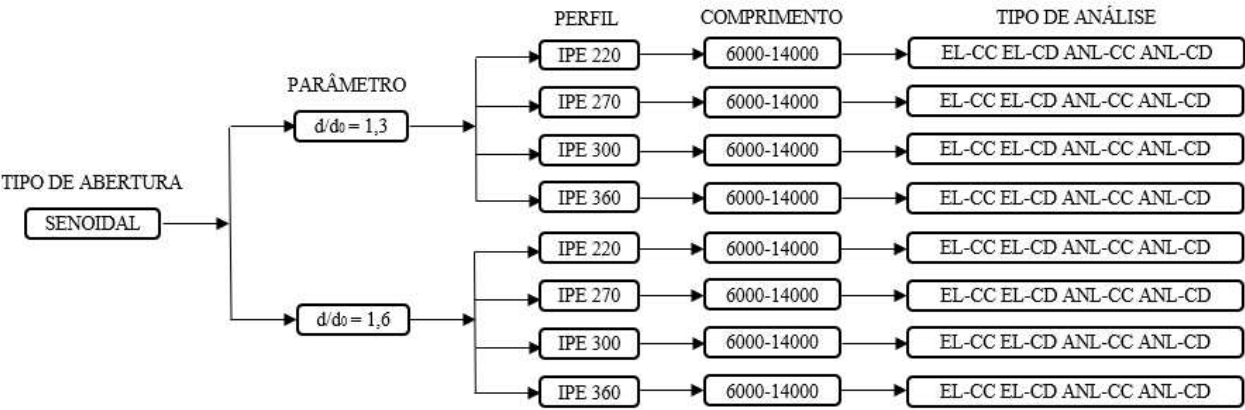
O estudo paramétrico realizado visou analisar a FLT em vigas angelinas a fim de determinar o momento crítico elástico da estrutura e o momento último. Foram realizadas análises lineares elásticas e não lineares inelásticas em 4 perfis de vigas angelinas do tipo IPE, que são: IPE 220, IPE 270, IPE 300 e IPE 360 com comprimento variando de 6 a 14 metros. Além disso, a relação d/d_0 , foi variada, onde (d) é a altura total da viga após a expansão da viga e (d_0) é a altura do perfil I inicial. As análises foram realizadas para $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$, para carga distribuída ao longo do vão (Figura 3.7a) e para carga concentrada no meio do vão (Figura 3.7b). Logo, foram realizadas um total de 80 análises lineares elásticas e não lineares inelásticas (Figura 3.8).

Figura 3.7 – Configuração dos carregamentos utilizados nas análises.



Fonte: Autor (2025).

Figura 3.8 – Fluxograma dos modelos numéricos analisados.



Fonte: Autor (2025).

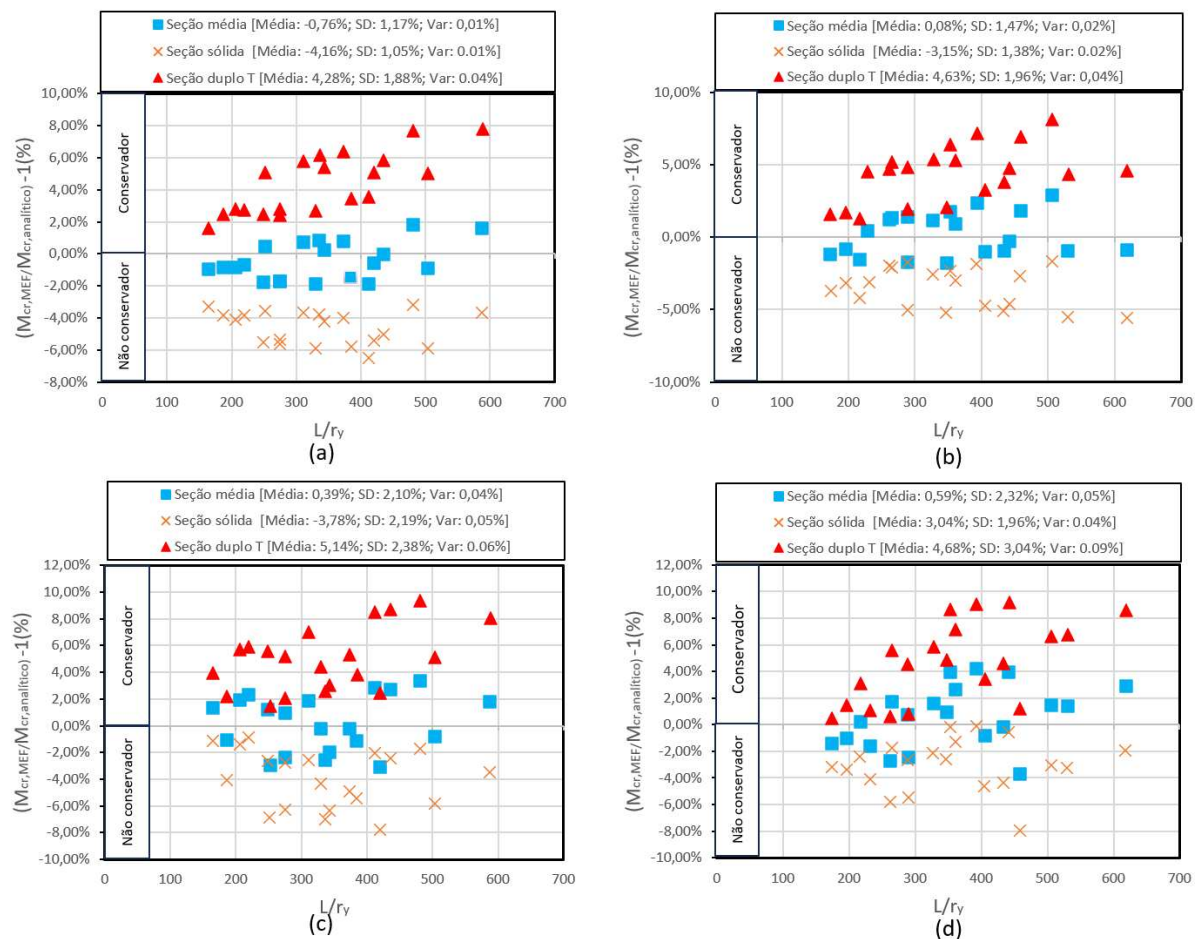
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MOMENTO CRÍTICO ELÁSTICO

A partir do estudo paramétrico realizado para os diferentes tipos de perfis e parâmetros apresentados anteriormente, foram obtidos vários valores devido ao grande número de análises. A partir desses, foi possível determinar o momento crítico elástico das vigas. E para fim de validação, esses resultados foram comparados com os resultados presentes na literatura. Precisamente, os resultados obtidos foram comparados com os resultados analíticos do momento crítico básico apresentado Timoshenko e Gere (1961), e adaptado pela abordagem duplo T proposta por Kerdal e Nethercot (1984) nas normas ABNT NBR 8800:2024 e EN 1993-

1-13:2024. Os resultados numéricos foram comparados com os analíticos referentes às vigas de alma cheia, abordagem de cálculo duplo T e pela média simples entre a seção de alma cheia e abordagem duplo T. A figura 4.1 (a, b, c e d) mostra os resultados obtidos comparados com os resultados analíticos da literatura para dois tipos de carregamentos, concentrado e distribuído e para dois parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$. Sendo a figura 4.1 (a e b) referentes à carga concentrada no meio do vão livre da viga com parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente e a figura 4.1 (c e d) referentes à carga distribuída ao longo do vão livre da viga com parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente.

Figura 4.1 – Momento crítico elástico: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – ABNT NBR 8800:2024



Fonte: Autor (2025).

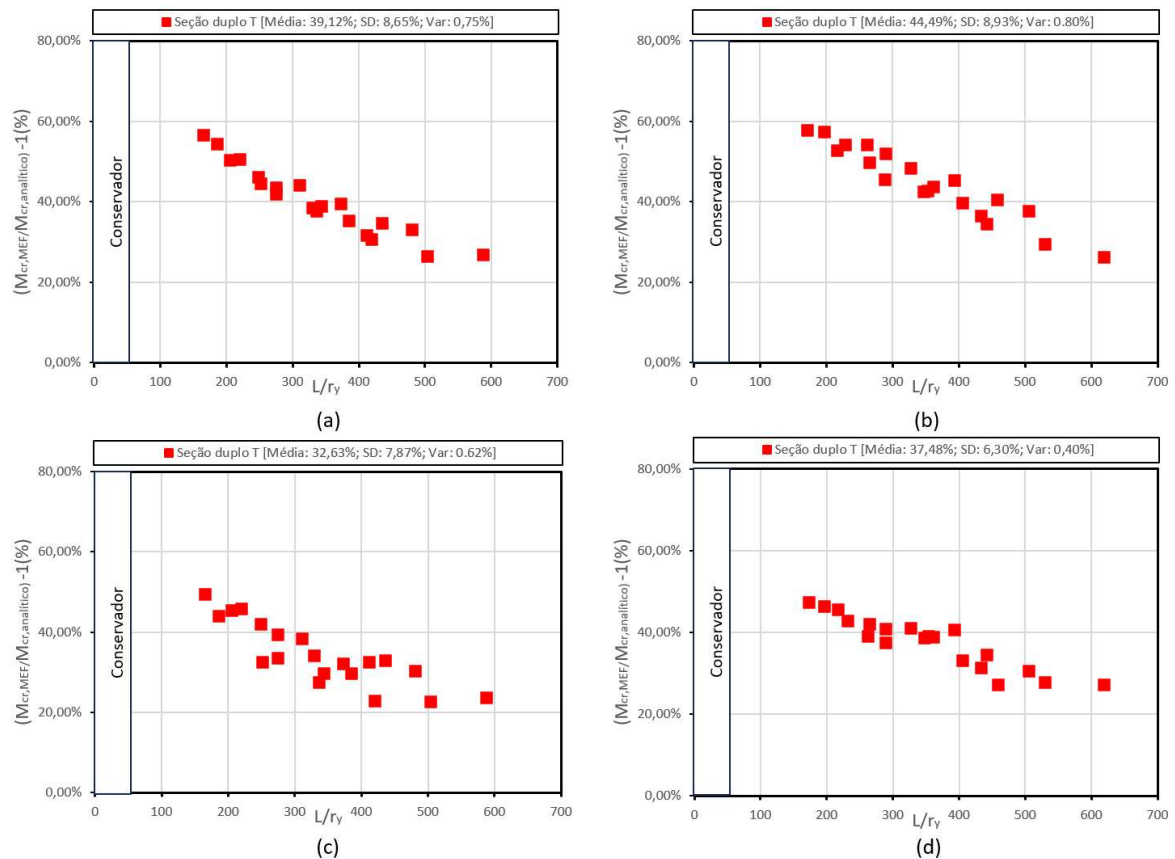
Analisando a figura 4.1 (a e b) referentes à carga concentrada no meio do vão percebe-se que considerando a seção da alma cheia foram obtidos resultados não conservadores, ou seja, valores que vão contra a segurança, o que é era de se esperar pois sem a presença das aberturas na alma acaba que reduzindo a capacidade de carga das vigas. Ainda, vale ponderar que quando a seção duplo T é considerada para efeito de cálculos, são obtidos valores conservadores, indo

em direção às conclusões dos autores citados anteriormente, porém, vale mencionar que neste trabalho o maior comprimento de viga analisado é de 14m e analisando a figura 4.1a e 4.1b é possível perceber que na medida em que o comprimento da viga é aumentado os resultados tendem a caminhar ainda mais para o lado conservador. Entretanto, considerando a seção média da viga foram obtidos valores que variam entre o lado conservador e não conservador, esses valores se tornam mais conservadores à medida que o comprimento aumenta.

Em relação à figura 4.1 (c e d) referente a carga distribuída ao longo do vão, foi possível perceber uma situação semelhante quando comparada com a figura 4.1 (a e b), visto que tanto a seção sólida quanto à seção média apresenta resultados pouco conservadores e resultados que caminham para o lado conservador à medida que o comprimento de viga analisado é aumentado. Além disso, quando são observados os parâmetros estatísticos como média, variância e desvio padrão percebe-se que existe pouca discrepância entre eles. Ainda, observando a seção duplo T, tem-se que os resultados se apresentam configuração semelhante quando comparados com os resultados obtidos referente à carga concentrada no meio do vão.

Ainda, de forma análoga, porém, tendo como base as expressões presentes no EUROCODE 3 foram realizadas análises numéricas e comparações dos resultados numéricos com os analíticos referentes à abordagem de cálculo duplo T. A figura 4.2 (a, b, c e d) mostra os resultados obtidos comparados com os resultados analíticos da literatura para dois tipos de carregamentos, concentrado e distribuído e para dois parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$. Sendo a figura 4.2 (a e b) referentes à carga concentrada no meio do vão livre da viga com parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente e a figura 4.2 (c e d) referentes à carga distribuída ao longo do vão livre da viga com parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente.

Figura 4.2 – Momento crítico elástico: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – EUROCODE 3



Fonte: Autor (2025).

Analisando a figura 4.2 (a e b) referente a carga concentrada no meio do vão e a figura 4.2 (c e d) referente a carga distribuída ao longo do vão percebe-se que também nessa situação a abordagem de cálculo duplo T também se sobressai apresentando resultados conservadores. Por outro lado, pode-se perceber que o comportamento gráfico apresenta certa diferença. Anteriormente, na análise realizada em função da norma ABNT NBR 8800:2024 a abordagem de cálculo duplo T apresentava uma tendência a favor do lado conservador conforme o comprimento de viga é aumentando, entretanto, analisando os gráficos da figura 4.2 (a, b, c e d) nota-se que acontece o inverso, conforme o comprimento de viga é aumentado a abordagem de cálculo duplo T caminha para o lado não conservador.

Portanto, em geral é possível perceber que para o cálculo da seção transversal de uma viga submetida a uma carga concentrada no meio do vão a abordagem de cálculo mais adequada é a que considera a seção duplo T. Para vigas submetidas a cargas distribuídas ao longo do vão a abordagem que se apresentou mais adequada também foi a duplo T. Em suma, foi possível também reafirmar as conclusões de autores citados anteriormente como Radic e Markulak

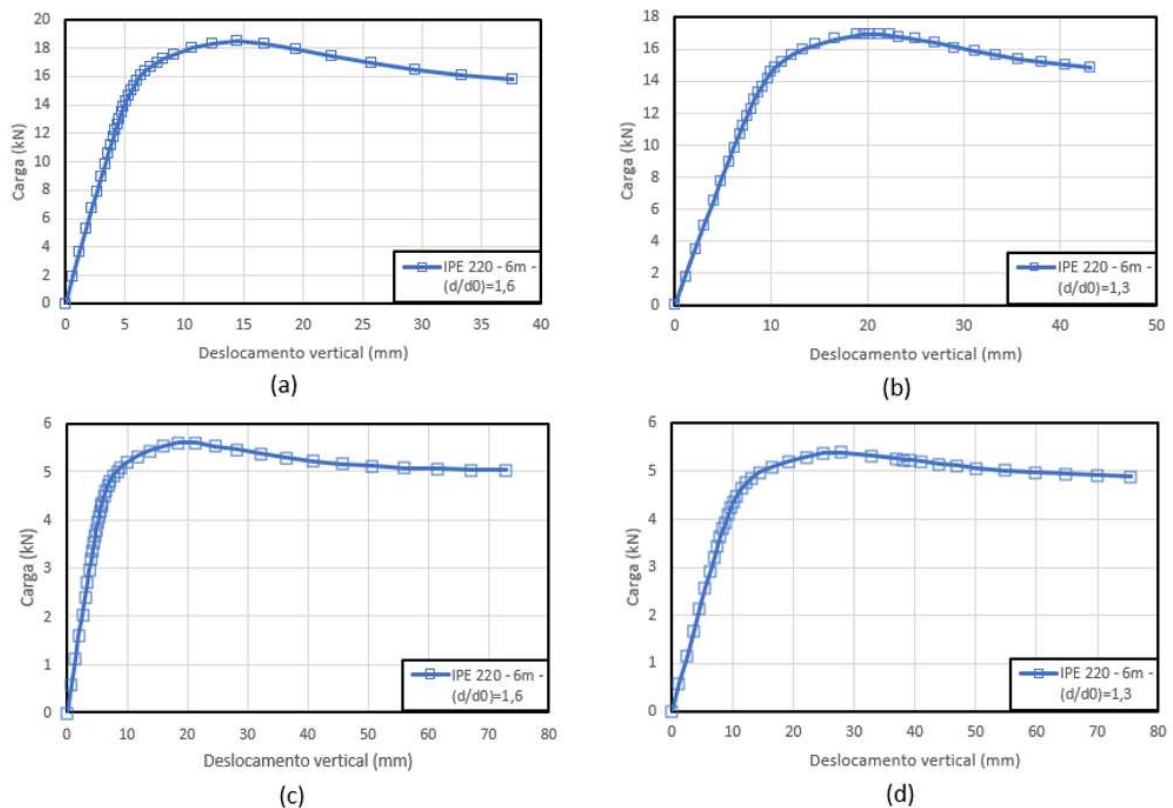
(2007) que métodos propostos pelo EC-3 são válidos para vigas alveolares. Também foi possível verificar a abordagem de cálculo duplo T proposta por Kerdal e Nethercot (1984) e aplicado pelos mesmos em vigas casteladas, visto que analisando as figuras 4.1 (a, b, c e d) e 4.2 (a, b, c e d) é possível verificar que para ambos os tipos de carregamentos aplicados a abordagem duplo T pode ser considerada mais adequada aos cálculos quando comparada com as demais. Logo, a abordagem também se torna válida para a aplicação em vigas alveolares com abertura senoidal na alma (AngelinaTM).

4.2 MOMENTO ÚLTIMO

Após a análise linear elástica do tipo *buckle* foi realizada a análise não linear inelástica a fim de determinar a carga última das vigas e posteriormente determinar o momento resistente das mesmas. Essa análise é caracterizada pela implementação das imperfeições iniciais na estrutura como as imperfeições geométricas e as tensões residuais. A imperfeição geométrica empregada na análise foi calculada seguindo a relação $L/1000$ e as tensões residuais empregadas foram calculadas seguindo o modelo proposto por Sonk, Vam Impe e Beliz (2014) e em seguida aplicada no modelo. A partir dessas análises foi possível obter informações sobre o comportamento das vigas ensaiadas.

Além disso, a análise não linear inelástica se destaca por aplicar as cargas na estrutura de maneira gradual e progressiva. Ainda, a partir da mesma foi possível obter curvas que mostram a relação entre carga incrementada na estrutura e o deslocamento resultante (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Curvas carga-deslocamento para a viga IPE 220 (6m) para carga concentrada no meio do vão e cargas distribuídas.



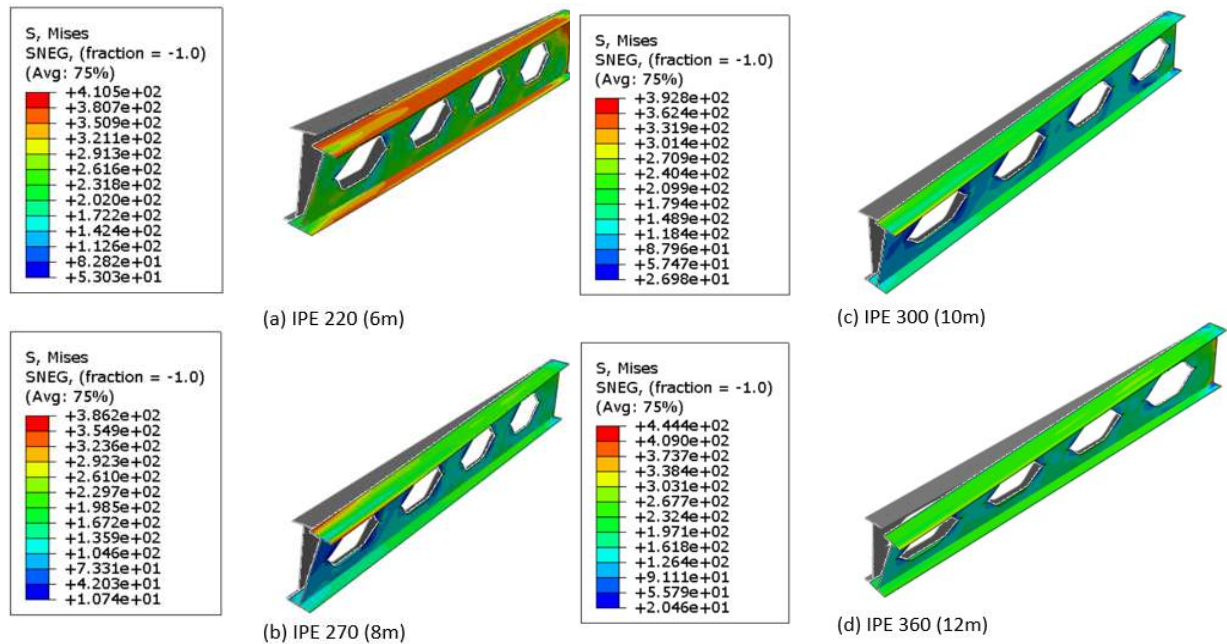
Fonte: Autor (2025).

Analisando as curvas da figura 4.3 (a e b) percebe-se que para carregamento concentrado no meio do vão não há grande discrepância entre as cargas máximas aplicadas na estrutura independentemente da variação dos parâmetros d/d_0 . Por outro lado, analisando o deslocamento imposto pelo carregamento é possível perceber que há uma diferença significativa de 10mm. Observando as curvas da figura 4.3(c e d) para cargas distribuídas no meio do vão tem-se que os carregamentos máximos aplicado nas estruturas apresentam o mesmo comportamento das vigas submetidas ao carregamento concentrado no meio do vão. Entretanto, o deslocamento imposto pelo carregamento não apresenta grande discrepância.

Ainda, por meio da análise não linear inelástica, foi possível analisar o modo de falha das vigas ensaiadas numericamente. Todos os modelos de vigas testados nesse trabalho apresentaram como modo de falha a instabilidade global devido à FLT. A figura 4.4 (a, b, c e d) mostra alguns perfis ensaiados em suas condições indeformadas e deformadas. Nas figuras é visível os deslocamentos laterais e também os giros das seções transversais caracterizando

assim a FLT. Além disso, também é possível observar que quanto maior é a seção transversal da viga menor são as tensões residuais atuantes.

Figura 4.4 – Vigas na condição indeformada-deformada na análise não linear elástica.

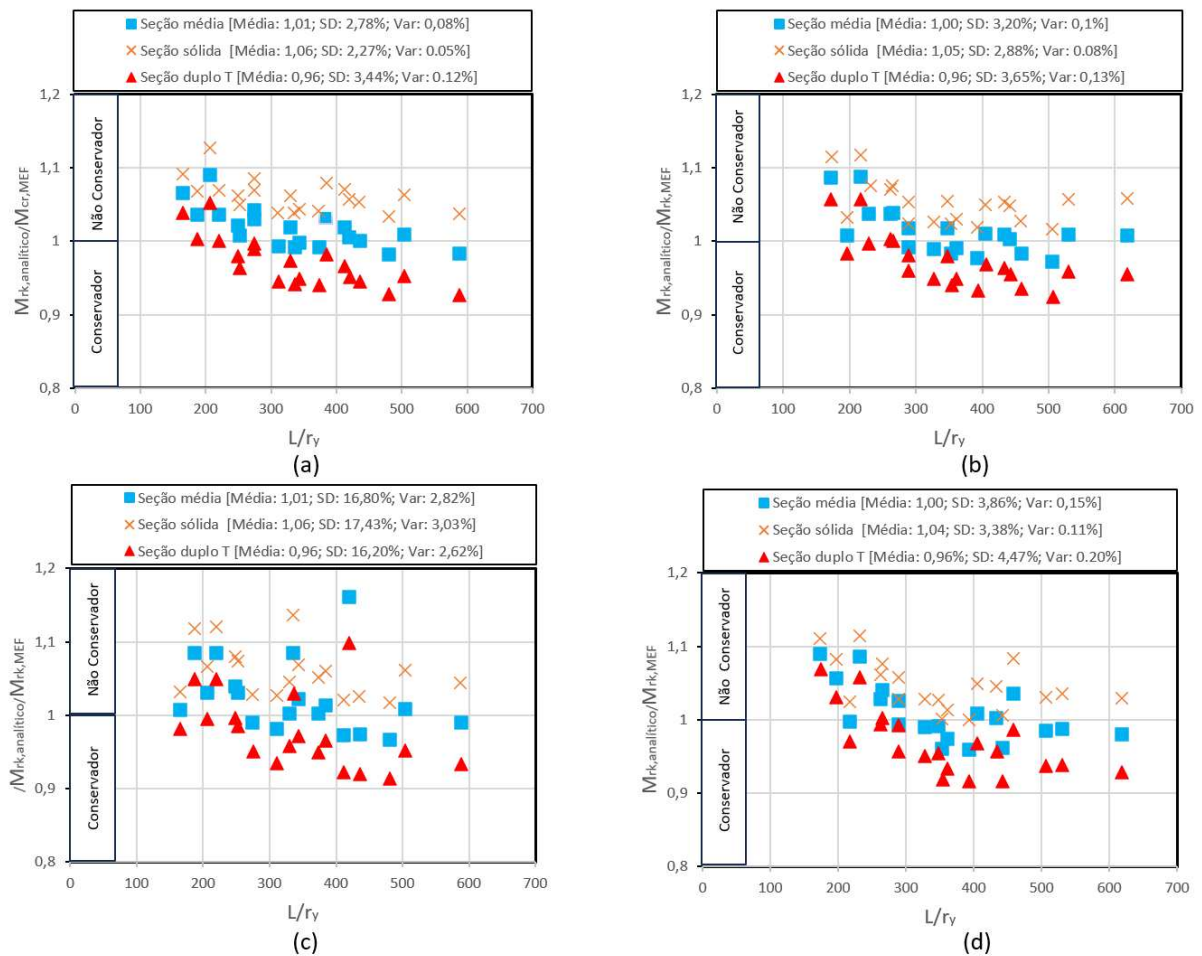


Fonte: Autor (2025).

Ademais, foram realizados os cálculos dos momentos resistentes das vigas ensaiadas conforme procedimentos normativos das normas ABNT NBR 8800:2024 e EUROCODE 3 e comparados com os valores resultantes do modelo numérico. Os resultados estão expostos nas figuras 4.5 (a, b, c e d) – ABNT NBR 8800:2024 e 4.6 (a, b, c e d) EUROCODE 3 respectivamente. Os resultados apresentam comparações entre os valores de momento último obtidos numericamente com os valores obtidos de forma analítica.

A figura 4.5 (a, e b) apresenta os resultados para carregamento concentrado e parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente. A figura 4.5 (c e d) mostra os resultados referentes aos carregamentos distribuídos ao longo do vão com parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente.

Figura 4.5 – Momento resistente: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – ABNT NBR 8800:2024

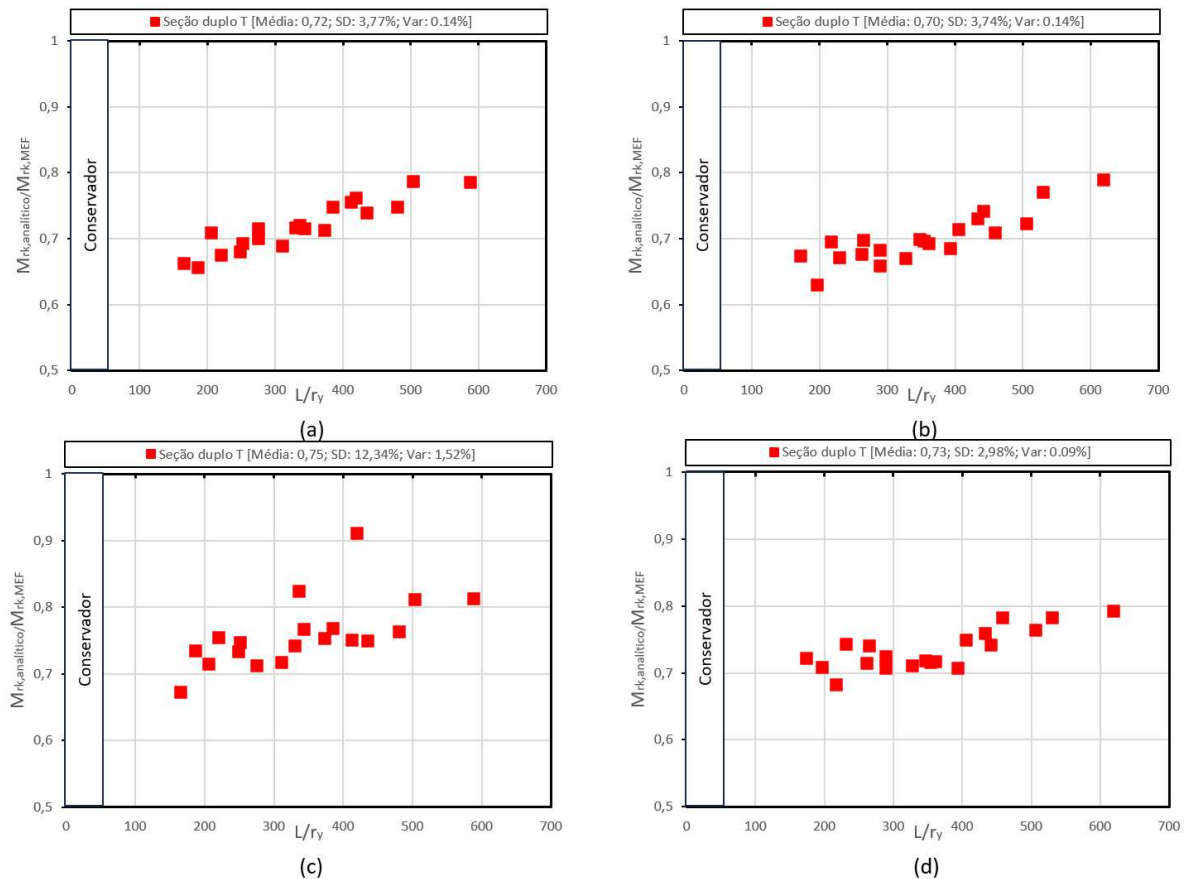


Fonte: Autor (2025).

Analisando a figura 4.5 (a, b) é possível perceber que os resultados obtidos tanto para a relação $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ apresenta configurações semelhantes, visto que os valores estatísticos não destoam, além disso, pode-se notar que a dispersão dos resultados é diferente dos resultados obtidos para momento crítico. Tendo em vista que a seção sólida e a média apresentam valores contra a segurança, porém, conforme o comprimento de viga é aumentado os resultados tendem a caminhar para a segurança. Nesse contexto, a abordagem de cálculo duplo T também apresenta valores conservadores. Ainda, analisando os gráficos e os valores estatísticos da figura 4.5 (c e d) nota-se que há certa discrepância de resultados, porém, a abordagem de cálculo duplo T segue como a melhor alternativa de cálculo visto que ainda apresenta valores conservadores.

A figura 4.6 (a, e b) apresenta os resultados para carregamento concentrado e parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente. A figura 4.6 (c e d) mostra os resultados referentes aos carregamentos distribuídos ao longo do vão com parâmetros $d/d_0 = 1,3$ e $d/d_0 = 1,6$ respectivamente.

Figura 4.6 – Momento resistente: influência da metodologia de cálculo das propriedades geométricas – EUROCODE 3



Fonte: Autor (2025).

Analisando a figura 4.6 (a, b, c e d) referente às cargas concentradas no meio do vão, às cargas distribuídas ao longo do vão, às relações d/d_0 igual a 1,3 e 1,6 e aos procedimentos de cálculo do EUROCODE 3 adaptados pela abordagem de duplo T, percebe-se que analogamente aos resultados de momento crítico os resultados de momento último também caminham dentro da segurança e, além disso, ao contrário dos gráficos de momento crítico os valores tendem a se tornar ainda mais conservadores à medida que o comprimento de viga é aumentado.

Portanto, tem-se que para cálculo do momento resistente de vigas com aberturas senoidais na alma tanto para carregamentos concentrados quanto para carregamentos

distribuídos ao longo do vão a abordagem de cálculo duplo T para determinação das propriedades geométricas da seção transversal de vigas se mostra conservadora.

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado exposto nesse artigo buscou entender o fenômeno da FLT em vigas alveolares com abertura em padrão senoidal na alma, mais conhecidas como vigas Angelina™ através de análises numéricas no software comercial ABAQUS. A partir das várias análises numéricas realizadas e dos parâmetros adotados foi possível obter vários valores referentes ao modo de falha das vigas. Foram realizadas análises lineares elásticas do tipo *buckle* a fim de determinar o momento crítico das vigas, nessas análises as imperfeições iniciais das vigas não foram levadas em consideração. Posteriormente, foram realizadas análises não lineares inelásticas, nessa, as imperfeições iniciais foram consideradas, ou seja, as imperfeições geométricas e tensões residuais foram implementadas nas análises.

Portanto, a partir dos resultados obtidos para momento crítico básico calculados pela abordagem de cálculo apresentado por Timoshenko e Gere (1961), e adaptado pela abordagem duplo T proposta por Kerdal e Nethercot (1984) na norma ABNT NBR 8800:2024 e EN 1993-1-13:2024, foi possível concluir que a abordagem de cálculo duplo T para determinação das propriedades geométricas da seção transversal de vigas se mostra conservadora quando analisada levando em consideração ambos os tipos de carregamentos, a saber: carregamento concentrado no meio do vão carregamento distribuído ao longo do vão, ainda vale ressaltar que à medida que o comprimento é aumentado a abordagem duplo T se torna ainda mais conservadora. Por outro lado, a abordagem considerando a seção média simples da viga para carregamentos concentrados e distribuídos apresenta discrepância na distribuição dos valores, visto que em algumas situações apresentam valores em direção à segurança e outras contrárias à segurança, logo, pode não ser uma boa alternativa para cálculo. Em suma, pode-se concluir que a melhor alternativa para o dimensionamento das propriedades da seção transversal de vigas alveolares com abertura em padrão senoidal é a abordagem duplo T.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800:2024 Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro, 2024.

ABREU, L. M. P.; FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares, *Mecânica Computacional* Vol XXIX, págs. 7255-7271, Buenos Aires, Argentina, 2010.

ARCELORMITTAL. ACB ® and Angelina TM beams. 2022.

A. ROSSI, R.S. NICOLETTI, A.S.C. DE SOUZA, C.HUMBERTO MARTINS. Lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams: a review *Structures*, 27 (2020), pp. 1299-1312, [10.1016/j.istruc.2020.07.026](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.026).

CARVALHO, A. S.; ROSSI, ALEXANDRE; MARTINS, C. H. Assessment of lateral-torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. *THIN-WALLED STRUCTURES JCR*, v. 175, p. 109242, 2022.

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*, Vol. 57, 2000, pp. 467-490.

DURIF, S.; BOUCHAÏR, A. Behavior of cellular beams with sinusoidal openings. *Procedia Engineering*, v. 40, p. 108–113, 2012

DURIF, S.; BOUCHAÏR, A.; VASSART, O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 82, p. 72–87, 2013

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

EARLS, C. J. On the inelastic failure of high strength steel I-shaped beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 49, n. 1, p. 1–24, 1999b.

ELLOBODY, E.; “Interaction of buckling modes in castellated beams”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, 2010, pp. 814-825.

EN 1993-1-1:2002. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2002

EN 1993-1-13:2024. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-13: Beams with large web openings

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, B. EN 1993-1-6, 1999. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-6: General Rules: Strength and Stability of Shells Structures. [s.d.].

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

J. SZALAI, F. PAPP, Uma nova distribuição de tensão residual para seções laminadas a quente em forma de I, *J. Constr. Aço Res.* 61 (2005) 845–861. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.12.004>.

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

MARTINHO, M. R. L. Vigas de Aço Alveoladas: Análise e Dimensionamento Estrutural. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

NSEIR, J. et al. Lateral torsional buckling of cellular steel beams. *Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2012*, n. January 2015, p. 484–498, 2012.

RADIC, I.; MARKULAK, D.; “Lateral buckling of castellated beams”, *Technical Gazette*, Vol. 14, 2007, pp. 25-35

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

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

TARAS, A.; GREINER, R. New design curves for lateral-torsional buckling-Proposal based on a consistent derivation. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 66, n. 5, p. 648– 663, 2010.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. *Theory of Elastic Stability*. 2 a ed., Nova Iorque, McGrae-Hill, 1961.