

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO PIUMHI
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

Marina Molinar Gonzales

**ESTUDO COMPARATIVO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS DA FLAMBAGEM
LATERAL COM TORÇÃO COM OS RESULTADOS ANALÍTICOS OBTIDOS PELA
NBR 8800:2008**

Piumhi - MG

2021

Marina Molinar Gonzales

**ESTUDO COMPARATIVO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS DA FLAMBAGEM
LATERAL COM TORÇÃO COM OS RESULTADOS ANALÍTICOS OBTIDOS PELA
NBR 8800:2008**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Instituto Federal de Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientadora: Professora Mestra Carla Cristiane Silva

Piumhi - MG

2021

G643e Gonzales, Marina Molinar.

Estudo comparativo dos resultados numéricos da flambagem lateral com torção com os resultados analíticos obtidos pela NBR 8800:2008 [manuscrito] / Marina Molinar Gonzales. – 2021.
71 f. : il.

Orientadora: Carla Cristiane Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* Avançado Piumhi, 2021.

1. Vigas. 2. Flambagem lateral com torção. 3. ANSYS (Sistema de Computador). 4. Distorção da alma. I. Silva, Carla Cristiane. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Avançado Piumhi. III. Título.

CDD 624.1

Catálogo: Andreia Cristina Damasceno - CRB-6/1976

Marina Molinar Gonzales

**ESTUDO COMPARATIVO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS DA
FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO COM OS RESULTADOS
ANALÍTICOS OBTIDOS PELA NBR 8800:2008**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 16 / 04 / 2021 pela banca examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Piumhi, 28 de abril de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Carla Cristiane Silva, Professora**, em 28/04/2021, às 16:00, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Stella Maria Gomes Tome, Professora**, em 28/04/2021, às 16:12, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Ceile Cristina Ferreira Nunes, Professora**, em 28/04/2021, às 16:37, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Domiciano Felicio, Professora Substituta**, em 28/04/2021, às 17:00, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Thais de Oliveira Azevedo, Professora Substituta**, em 28/04/2021, às 18:34, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs>



informando o código verificador **0825177** e o código CRC **961A29E8**.

23715.000162/2021-20

0825177v1

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida e me permitir chegar onde estou, me agradando com todas as providências necessárias, ademais, por tudo.

Aos meus pais, Carlos Henrique e Ana Paula por serem a base de tudo e, apesar das barreiras, me apoiarem em todos os caminhos pelos quais decidi seguir ao longo da minha vida. Aos meus irmãos pela paciência e pela companhia aos meus pais enquanto estive longe de casa.

À minha querida avó Marilene (in memoriam) por todo o carinho, conselhos e incentivo.

À professora Me. Carla Cristiane Silva, pela orientação competente, solicitude e empenho em me auxiliar. Também pelas aulas instigantes e esclarecedoras que despertaram meu interesse nesse segmento e principalmente pelas contribuições em conhecimento técnico que foram primordiais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais pela oportunidade de cursar uma graduação de qualidade.

A todos os professores do *campus* Piumhi que me ofertaram aulas de qualidade nesses cinco anos, pelo exemplo profissional, conhecimentos ofertados e inspiração para o meu crescimento acadêmico, pessoal e profissional.

Aos técnicos e demais servidores do *campus*, pela gentileza de sempre.

Aos meus amigos e parentes que sempre me apoiaram e acreditaram em mim. De maneira especial às amigas conquistadas em Piumhi, pela parceria e por todas as horas de descontração durante a trajetória da graduação, que a tornou mais prazerosa de se percorrer.

Enfim, a todos os contribuíram, direta ou indiretamente, para a conclusão desse trabalho e da graduação. A todos, muito obrigada.

RESUMO

A flambagem lateral com torção (FLT) é um estado-limite último caracterizado pela translação lateral combinada com a torção até atingir o colapso. Foram comparados diferentes resultados de análise da FLT em vigas metálicas de perfil I duplamente simétrico biapoiadas com vínculo de garfo, analíticos, segundo a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, e numéricos, cujo *software ANSYS* foi pioneiro na sua aplicação através do Método dos Elementos Finitos. Os procedimentos analíticos consideram a alma do perfil I rígida e assim permanece após a deformação, o que não ocorre na prática, enquanto os métodos numéricos apresentam flexão da alma durante a flambagem. Para a comparação foram usados modelos de viga com comprimento destravado igual ao comprimento do vão, as mesas livres para se deslocar lateralmente e atuação de momento fletor uniforme. A variação dos modelos para alcançar resultados representativos foi feita a partir de diferentes comprimentos destravados e ainda variando-se a esbeltez da alma e das mesas. Conclui-se que a influência do efeito da distorção da alma no momento crítico elástico aumenta com a elevação da esbeltez da alma e com a redução da esbeltez das mesas e do comprimento destravado. Em algumas situações a desconsideração desse efeito pode conduzir a resultados contrários à segurança, ao passo que em outras, esse efeito apresenta influência sobre o momento crítico elástico pouco significativa, podendo ser desprezado.

Palavras-chave: Vigas metálicas. Flambagem lateral com torção. Distorção da alma. *ANSYS*.

ABSTRACT

The lateral torsional buckling is a limit state characterized by the combination of lateral displacement with twist until it reaches the collapse. Different results of lateral torsional buckling analyses in steel beams of doubly symmetric I-section of simply supported with free warping and restrained twist in the both ends were compared, analytical results obtained from Brazilian standard ABNT NBR 8800:2008, and numerical results, whose software ANSYS was pioneer in your application from Finite Element Method's. Analytical procedures consider the web of I-section rigid, which doesn't happen in reality. In contrast, numerical methods include deflection of the web during the buckling. Models of beam with the effective length equal to the span, with both flanges free to move laterally and subjected to uniform bending moment was used to compare. In order to reach representative results models was varied with different length of the beams, web slenderness and flange slenderness. It was concluded that the influence of the effect of web distortion in the value of the elastic critical moment increases with the increase of the web slenderness and with the decrease of the flange slenderness and of the length. In some situations, the disregard of this effect can lead to unsafe results, while in others situations this effect has little influence on the critical elastic moment, can be unvalued.

Keywords: Steel beams. Lateral torsional buckling. Web distortion. ANSYS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Flambagem lateral com torção de viga com seção I.....	17
Figura 2 - Seções contidas lateralmente	18
Figura 3 - Comprimentos destravados.....	19
Figura 4 - Ligação flexível e ligação rígida.....	19
Figura 5 - Flambagem lateral com torção e distorção	20
Figura 6 - Fluxograma de ações metodológicas	21
Figura 7 - Dimensões de um perfil I duplamente simétrico	24
Figura 8 - Perfil I de face inclinada e perfis I e H de faces paralelas	30
Figura 9 - Viga contínua e discreta.....	32
Figura 10 - Princípio de resolução de métodos aproximados.....	32
Figura 11 - Configuração da malha de elementos finitos.....	33
Figura 12 - Discretização de uma viga de perfil I com elementos <i>SHELL181</i>	33
Figura 13 - Interface Gráfica do Usuário do <i>Ansys Mechanical APDL</i> versão acadêmica	35
Figura 14 - Esquema de etapas para criação de um <i>script</i>	37
Figura 15 - Flambagem lateral com torção e distorção na alma.....	38
Figura 16 - Diagrama simplificado de tração <i>versus</i> deformação dos aços estruturais.....	39
Figura 17 - Elemento <i>SHELL181</i>	42
Figura 18 - Dimensões de um perfil I com dupla simetria	43
Figura 19 - Diferentes densidades analisadas.....	45
Figura 20 - Sistema de coordenadas e geometria por retângulos	47
Figura 21 - Restrições de translação e rotação	50
Figura 22 - Modo de flambagem com vínculo de garfo	50
Figura 23 - Caso de momento fletor constante com restrições de vínculo de garfo.....	51
Figura 24 - Simulação de momento constante ao longo de todo o comprimento destravado ..	51
Figura 25 - Distorção da alma	52
Figura 26 - Ilustração da flambagem lateral com torção do modelo FLT03.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Momento fletor resistente nominal para FLT de perfis I fletidos em relação a x com C_b igual a 1,0.	24
Gráfico 2 - Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma, h_w/t_w , para os vários comprimentos destravados, L_b	55
Gráfico 3 - Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma, h_w/t_w , para cada valor de esbeltez da mesa, $b_f/2t_f$	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características geométricas da viga padrão para refinamento da malha.....	43
Tabela 2 - Validação dos modelos numérico e analítico.....	46
Tabela 3 - Modelos utilizados para os cálculos numéricos e analíticos.....	48
Tabela 4 - Resultados analíticos e numéricos para os modelos FLT01 à FLT42.....	53
Tabela 5 - Resultados analíticos e numéricos para os modelos FLT07 à FLT12 e FLT43 à FLT54.....	57

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APDL	<i>ANSYS Parametric Design Language</i>
ELS	Estados-limites de Serviço
ELU	Estados-limites Últimos
FD	Flambagem Distorcional
FEA	<i>Finity Elements Analysis</i>
FEM	Fábrica de Estruturas Metálicas
FL	Flambagem Local
FLA	Flambagem Local da Alma
FLM	Flambagem Local da Mesa
FLT	Flambagem Lateral com Torção
FLTD	Flambagem Lateral com Torção e Distorção da Alma
GUI	<i>Graphical User Interface</i> (Interface Gráfica do Usuário)
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas Maiúsculas

C_b	fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme
C_w	constante de empenamento da seção transversal
E	módulo de elasticidade longitudinal do aço
I_y	momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y
J	constante de torção da seção transversal
L	comprimento do vão
L_b	comprimento destravado da viga
M_0	momento solicitante
M_A	momento solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda
M_B	do momento solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado
M_C	do momento solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda
M_{cr}	momento crítico elástico
$M_{cr,an}$	momento crítico elástico dos procedimentos analíticos
$M_{cr,num}$	momento crítico elástico da análise numérica
$M_{máx}$	momento máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado
M_{pl}	momento de plastificação da seção transversal
M_{Rd}	momento resistente de cálculo
M_r	momento fletor correspondente ao final do regime elástico
M	momento fletor solicitante
W_x	módulo de resistência elástico da seção transversal em relação ao eixo x
Z_x	módulo de resistência plástica da seção transversal em relação ao eixo x

Letras Romanas Minúsculas

b	metade da largura da mesa da seção transversal
b_f	largura da mesa da seção transversal
d	altura total da seção transversal
f_y	tensão de escoamento do aço

h_0	distância entre as linhas médias das mesas da seção transversal
h_w	altura da alma da seção transversal
l	comprimento do vão
r_y	raio de giração da seção transversal em relação ao eixo y
t_f	espessura das mesas da seção transversal
t_w	espessura da alma da seção transversal
x,y,z	coordenadas cartesianas

Letras Gregas

β_l	coeficiente de correção para a esbeltez crítica
λ	índice de esbeltez
λ_p	índice de esbeltez limite para seções compactas
λ_r	índice de esbeltez limite para seções semicompactas
μ	deslocamento lateral
ν	coeficiente de Poisson do aço
φ	ângulo de torção
ω	empenamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	16
1.2	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO	17
1.2.1	Definição	17
1.2.2	Influência da distorção da alma	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Geral.....	20
1.3.2	Específicos	20
1.4	METODOLOGIA	20
1.5	JUSTIFICATIVA.....	22
2	MÉTODOS NORMATIVOS PARA A FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO	23
2.1	ESBELTEZ DA ALMA.....	25
2.2	ESBELTEZ DA MESA	25
2.3	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO	25
3	REVISÃO DA LITERATURA	29
3.1	O AÇO COMO MATERIAL ESTRUTURAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL	29
3.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	31
3.3	<i>ANSYS</i>	34
3.3.1	Interface gráfica do usuário (GUI).....	34
3.3.2	Ansys Parametric Design Language	36
3.3.3	Script	36
3.4	DISTORÇÃO DA ALMA	37
3.5	TIPOS DE ANÁLISES	38
4	DESENVOLVIMENTO	41
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	41
4.2	VIGAS ANALISADAS.....	41
4.3	ELEMENTO UTILIZADO.....	41
4.4	REFINAMENTO DA MALHA.....	42
4.5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	45
4.6	GENERALIDADES DO MODELO NUMÉRICO	46
4.7	CONDIÇÕES DE CONTORNO	49

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	52
5.2	INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DESTRAVADO E DA ESBELTEZ DA ALMA.....	53
5.3	INFLUÊNCIA DA ESBELTEZ DA MESA	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6.1	CONCLUSÕES	60
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – <i>SCRIPT</i> PARA PROCESSAMENTO DOS MODELOS NUMÉRICOS	65
	APÊNDICE B – PLANILHA PARA CÁLCULO DOS MODELOS ANALÍTICOS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A indústria da construção civil brasileira passa por uma mudança voltada para a inovação, o que reflete no uso de sistemas estruturais mais eficientes e econômicos, como por exemplo as estruturas de aço, que se destacam pela sua eficiência e viabilidade (VELLASCO *et al.*, 2014).

Segundo MARTHA (2017) e SILVA (2009), a análise estrutural, dentre outros objetivos, visa obter o comportamento da estrutura, ou seja, quais as respostas do elemento estrutural quando este é submetido a determinadas condições de contorno e solicitações. De maneira geral, entre as respostas estruturais podem-se citar reações de apoio, tensões, deslocamentos, forças atuantes, solicitações resultantes e deformações.

De acordo com FAKURY, SILVA E CALDAS (2016), as vigas de aço, quando submetidas a um carregamento crescente, sofrem aumento da curvatura inicial e da torção até atingir o colapso, ou seja, o momento fletor aumenta até o colapso da viga acontecer. Quando as imperfeições geométricas iniciais, como a curvatura, são desconsideradas e a viga é tomada idealmente com eixo reto, ela apresenta apenas translação lateral e torção subitamente quando o momento fletor de colapso é alcançado. Essa situação representa o estado limite último denominado FLT (flambagem lateral com torção).

A ABNT NBR 8800:2008 estabelece requisitos básicos para projetos estruturais e utiliza, para indicação dos cálculos, o método dos estados-limites. Esse método exige que nenhum estado limite seja excedido quando a estrutura estiver submetida a esforços combinados de maneira apropriada (ABNT, 2008).

O *software ANSYS* utiliza para a análise estrutural, o método dos elementos finitos (MEF), que segundo FERREIRA *et al.* (2015), é um método de análise de problemas contínuos, que são subdivididos em um número finito de partes conectadas por nós. As partes são denominadas de elementos da malha, que representam a subdivisão. Sendo assim, o *ANSYS* utiliza de elementos de malha com geometria definida para as análises numéricas.

O uso de diferentes métodos de análise estrutural pode gerar diferentes resultados que divergem ou convergem da resposta real do elemento estrutural. A construção civil, sobretudo os estudos a respeito das estruturas que suportam as cargas atuantes nas edificações, devem estar em constante evolução, buscando cada vez mais a assertividade das análises.

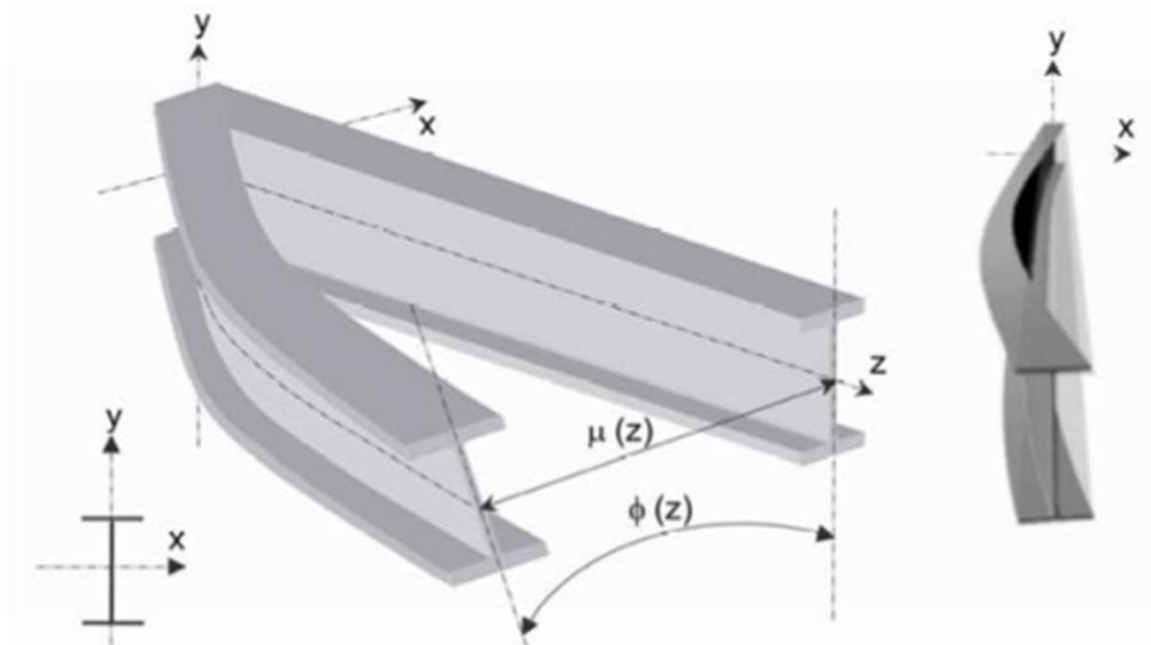
1.2 Flambagem lateral com torção

1.2.1 Definição

As vigas metálicas de perfil I, segundo SAITO, ROSSI e MARTINS (2019), estão sujeitas aos fenômenos de flambagem. Quando fletidas, elas podem atingir o colapso pela perda da estabilidade ou pela plastificação. Nos casos em que ocorre o colapso pela perda da estabilidade da viga, se diz que ela sofreu flambagem (ROSSI, 2018).

De acordo com GOMES (1993 apud ROSSI 2018), em elementos fletidos a flambagem pode ser local (FL) ou global. A primeira pode ocorrer na mesa comprimida (FLM), na alma (FLA) ou em ambas simultaneamente. Já a flambagem global ocorre através da FLT, caracterizada pela combinação de um deslocamento lateral, μ , e uma rotação, ϕ , como pode ser observado na Figura 1. Quando as vigas são submetidas a um momento fletor crescente em relação ao eixo x, a tendência é de que as imperfeições geométricas iniciais (curvatura lateral) aumentem gradativamente, assim como a torção, até atingir a instabilidade, caracterizada pelo colapso da viga.

Figura 1 - Flambagem lateral com torção de viga com seção I



Fonte: SAYED-AHMED, 2005 (apud Bezerra, 2011).

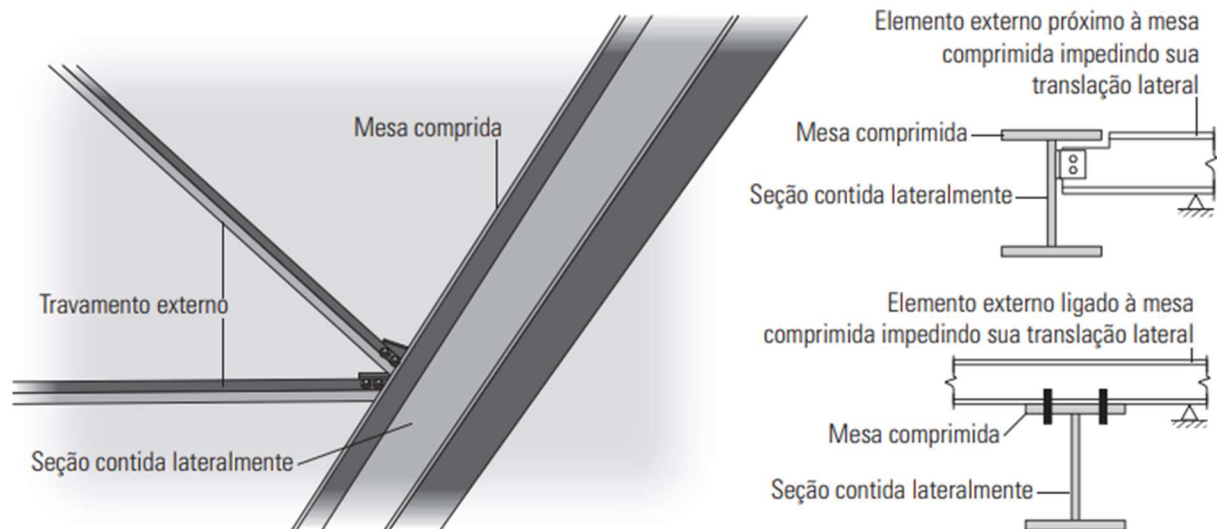
Nas vigas metálicas de perfis I, a FLT como estado limite-último pode ser explicada com o fato da mesa comprimida da viga tornar-se instável e estar continuamente ligada à mesa tracionada, que garante um efeito estabilizante provocando a translação lateral acrescida de torção (BEZERRA, 2011).

Para a flambagem lateral com torção em regime elástico, o momento resistente se dá em função do momento crítico elástico, isso porque o estado entre a estabilidade e a instabilidade se denomina estado crítico (REIS e CAMOTIM, 2001).

Segundo ROSSI (2018) e REIS (1996), a flambagem é função principalmente das características geométricas dos perfis, como o comprimento destravado e as dimensões da seção transversal, das condições de vinculação e do carregamento.

As seções transversais que possuem travamentos externos recebem o nome de seção contida lateralmente e por isso são impedidas de sofrer a FLT. No caso de perfis I, os travamentos externos mais comuns são aqueles que impedem o deslocamento lateral da mesa comprimida (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016). Na Figura 2-a, pode-se observar uma viga com perfil I, com uma seção contida lateralmente. Já a Figura 2-b ilustra outros dois tipos comuns de travamentos externos.

Figura 2 - Seções contidas lateralmente



(a) Viga com seção contida lateralmente

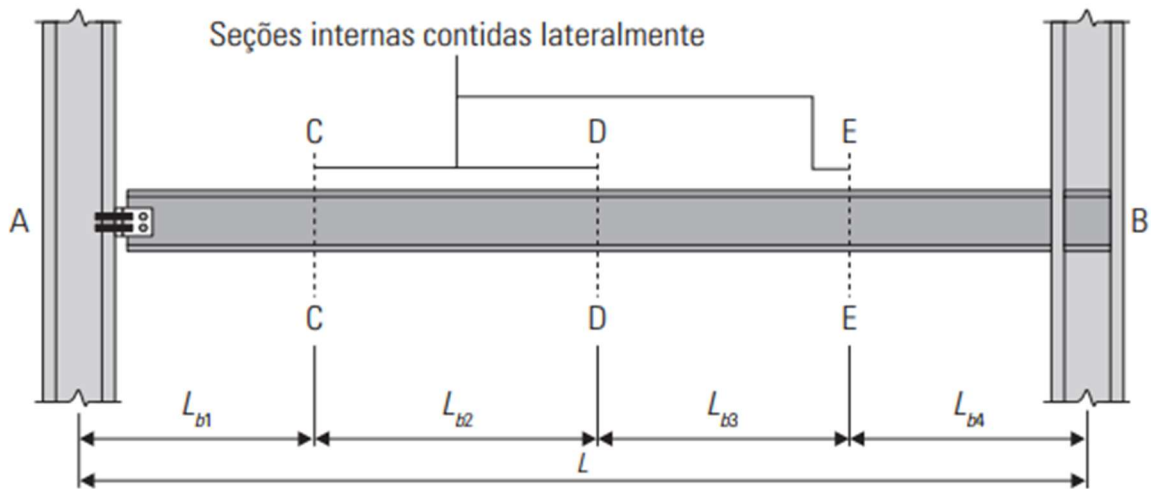
(b) Contenções laterais usuais

Fonte: FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

O comprimento de viga entre duas seções contidas lateralmente é denominado comprimento destravado e recebe o símbolo L_b . Quanto maior for esse comprimento, menor será o momento fletor resistente à FLT.

Na Figura 3, com as seções C, D e E contidas lateralmente, a viga possui quatro comprimentos destravados. Caso apenas as seções nos apoios sejam contidas lateralmente (A e B) a viga passa a ter somente um comprimento destravado, igual ao comprimento do vão.

Figura 3 - Comprimentos destravados

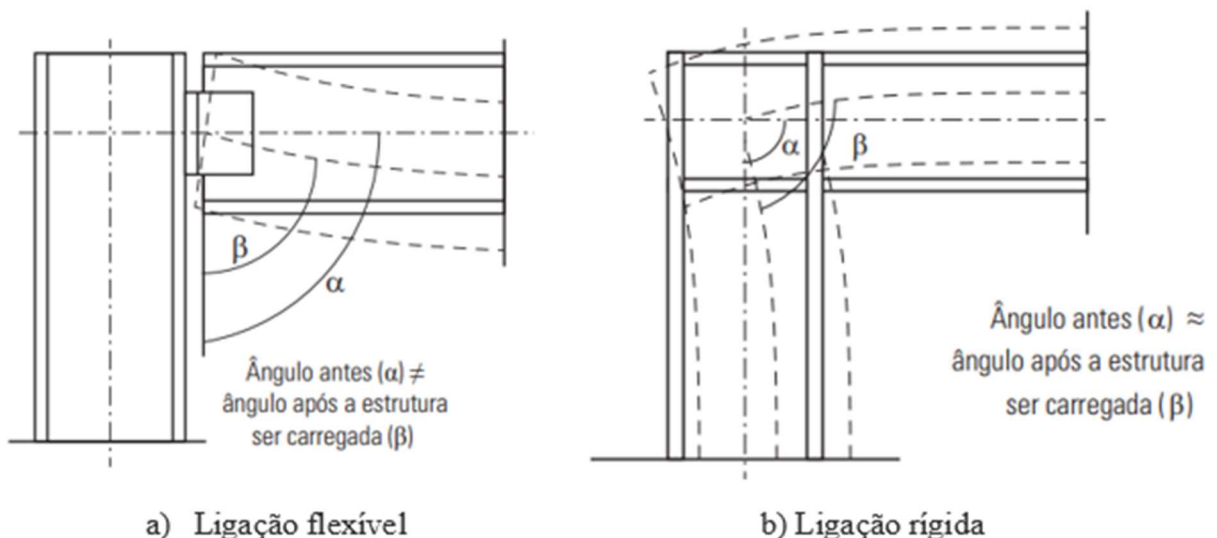


Fonte: FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

Dentre as condições de vinculação, o vínculo de garfo e o vínculo rígido são os mais presentes em obras com estruturas metálicas. O primeiro deles é caracterizado pelo impedimento de torção e empenamento livre, enquanto que o no segundo, ambos os deslocamentos são impedidos (ABREU, 2011).

O vínculo de garfo, que simula uma ligação flexível, pode ser observado na Figura 4-a, que ilustra esse tipo de ligação entre uma viga e um pilar. Já na Figura 4-b, é ilustrada a ligação do tipo rígida, que não permite empenamento.

Figura 4 - Ligação flexível e ligação rígida



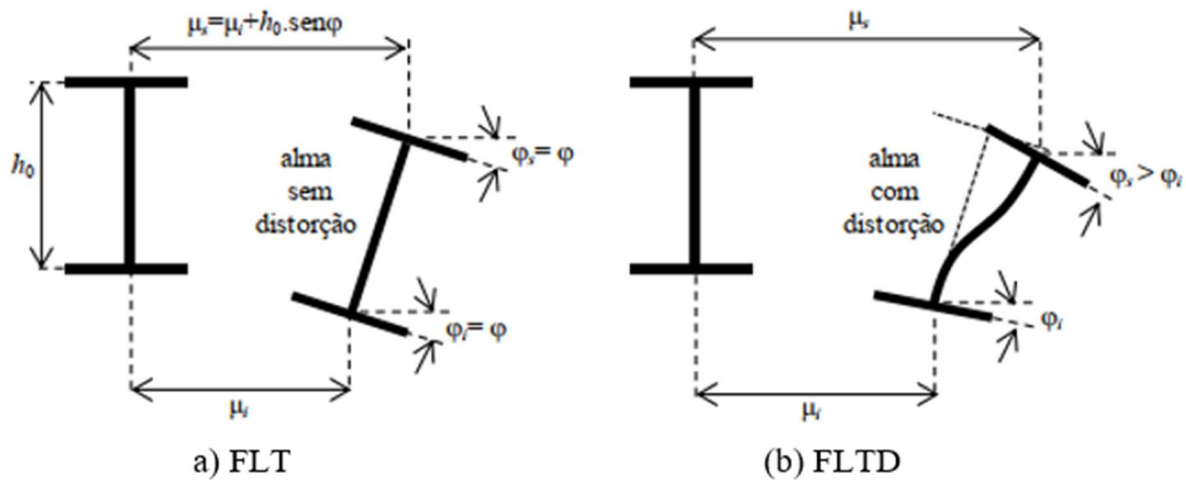
Fonte: Adaptado de FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

1.2.2 Influência da distorção da alma

Durante a ocorrência da flambagem lateral com torção, as vigas metálicas de perfis I duplamente simétricos podem apresentar também distorção da alma, caracterizando uma

flexão lateral da alma, como pode ser observado na Figura 5-b, que reduz o momento fletor resistente da viga (ROSSI, 2018). Entretanto, de acordo com a teoria clássica, a seção transversal da viga é tomada como rígida, ou seja, se mantém indeformável no seu plano, conforme pode ser observado na Figura 5-a (SILVA, 2017).

Figura 5 - Flambagem lateral com torção e distorção



Fonte: SILVA, 2017.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O presente estudo objetiva comparar os resultados analíticos obtidos para a análise de FLT através das prescrições da norma brasileira ABNT NBR 8800 de 2008 com os resultados numéricos obtidos através de simulações computacionais com o MEF pelo *ANSYS*.

1.3.2 Específicos

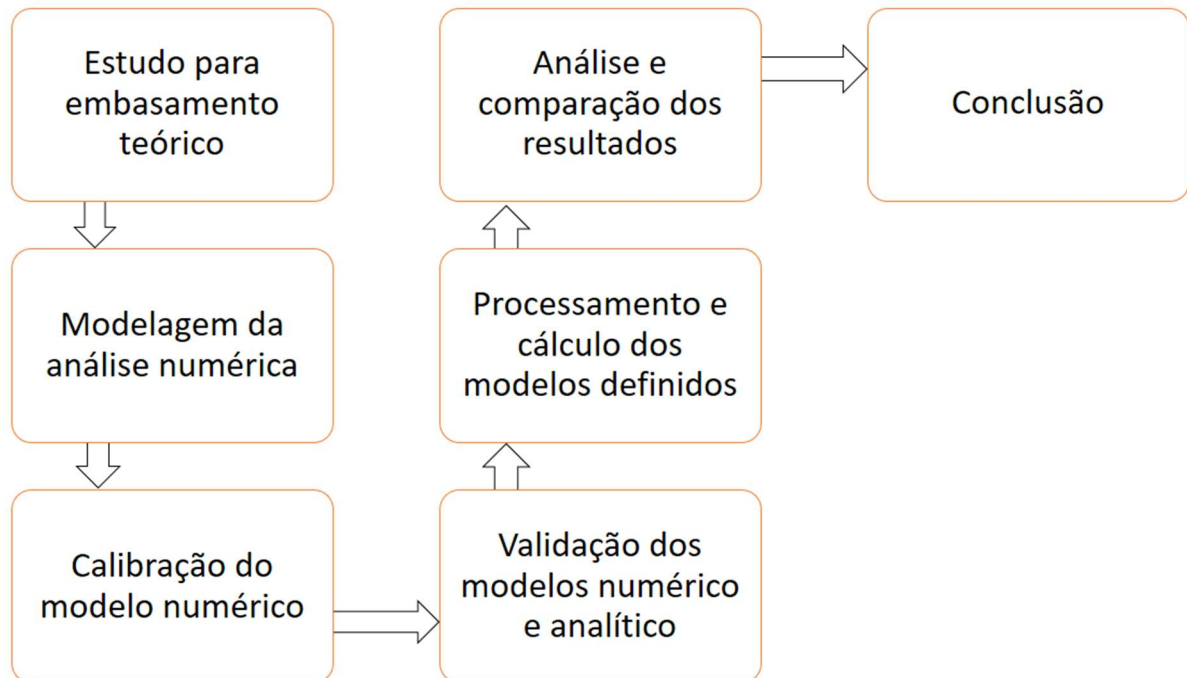
- Realizar diversas análises com diferentes seções transversais e comprimentos destravados em vigas metálicas de perfil I com o uso do *ANSYS*;
- Calcular os mesmos modelos a partir do método proposto pela NBR 8800:2008;
- Comparar e discutir possíveis divergências ou convergências, bem como a influência da distorção da alma nos resultados.

1.4 Metodologia

Com o propósito de alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram realizadas as etapas descritas a seguir. Também será exposto um fluxograma, na Figura 6, que resume os principais procedimentos adotados.

- I. Estudo da flambagem lateral com torção e suas influências em vigas metálicas com seção I duplamente simétricas, fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma, através de bibliografias específicas para aprofundamento do tema;
- II. Estudo do *software ANSYS*, bem como da versão *ANSYS Mechanical APDL* e da programação que envolve a análise de FLT;
- III. Elaboração da revisão bibliográfica;
- IV. Geração de um *script* com um modelo numérico padrão para de análise da FLT para vigas com vínculo de garfo utilizando o programa *ANSYS*;
- V. Calibração da malha de elementos finitos do modelo numérico;
- VI. Validação do *script* e da tabela de cálculo analítico através de estudos existentes;
- VII. Processamento dos modelos considerando a variação do vão da viga, esbeltez da alma e esbeltez da mesa buscando obter o momento crítico elástico;
- VIII. Obtenção dos momentos críticos dos mesmos modelos a partir dos procedimentos descritos na ABNT NBR 8800:2008;
- IX. Comparação dos resultados obtidos nas diferentes análises e discussão acerca das convergências e/ou divergências;
- X. Avaliação dos procedimentos e conclusão da pesquisa.

Figura 6 - Fluxograma de ações metodológicas



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

1.5 Justificativa

A desconsideração da distorção da alma das vigas metálicas nos procedimentos de cálculo para determinação do momento resistente a flambagem lateral com torção apresentados pela norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 pode ser significativa, principalmente quando se eleva a esbeltez da alma e se reduz o comprimento destravado e a esbeltez da mesa. A determinação do momento resistente depende fundamentalmente do momento crítico elástico. Portanto, o estudo do momento crítico elástico e da influência da distorção da alma sobre ele consiste em uma colaboração importante na melhoria das soluções desse tipo de problema.

Logo, a comparação entre diferentes metodologias permite a busca pelo aperfeiçoamento do cálculo, garantindo maior segurança e economia nas obras.

Cabe ressaltar, ainda, que a escolha por se trabalhar com uma análise numérica em um *software* que usa do Método dos Elementos Finitos é baseada no fato de ser uma experimentação de baixo custo e tempo, além de apresentarem resultados tão precisos quanto de estudos experimentais, quando devidamente calibrados.

Por fim, a restrição do estudo apenas às vigas de alma não-esbelta, enquadradas no anexo G da norma ABNT NBR 8800:2008 se justifica devido ao fato de serem as mais utilizadas em obras de construção civil.

2 MÉTODOS NORMATIVOS PARA A FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

Até meados da década de 1980, as normas que orientavam os projetos de estruturas metálicas adotavam o Método das Tensões Admissíveis para estabelecer os padrões de segurança estrutural. A partir de então, passaram a adotar gradativamente o Método dos Estados Limites, também conhecido como Método dos Coeficientes Parciais (PFEIL e PFEIL, 2009).

Essa mudança aconteceu, segundo CASTRO (1997), porque o método de cálculo em tensões admissíveis oferece poucos detalhes sobre a capacidade estrutural real do elemento, além de se mostrar uma ferramenta de cálculo pouco econômica. A partir dessas percepções, começaram a surgir as primeiras gerações de normas de cálculo baseadas na capacidade última dos elementos estruturais, conhecidas como normas de cálculo em estados limites.

Para que um projeto estrutural tenha sua resistência verificada, de acordo com esse novo método, os valores dos estados-limites últimos (ELU) e dos estados-limites de serviço (ELS) devem ser respeitados, ou seja, o método dos estados-limites verifica a estrutura em situações extremas (ABNT, 2008).

Os ELU relacionam-se com a segurança da estrutura, isto é, a perda da capacidade resistente pela ruptura ou pela perda da estabilidade, enquanto que os ELS estão relacionados ao desempenho da estrutura e são associados a aparência, funcionalidade, deslocamentos, flechas e desconforto dos usuários.

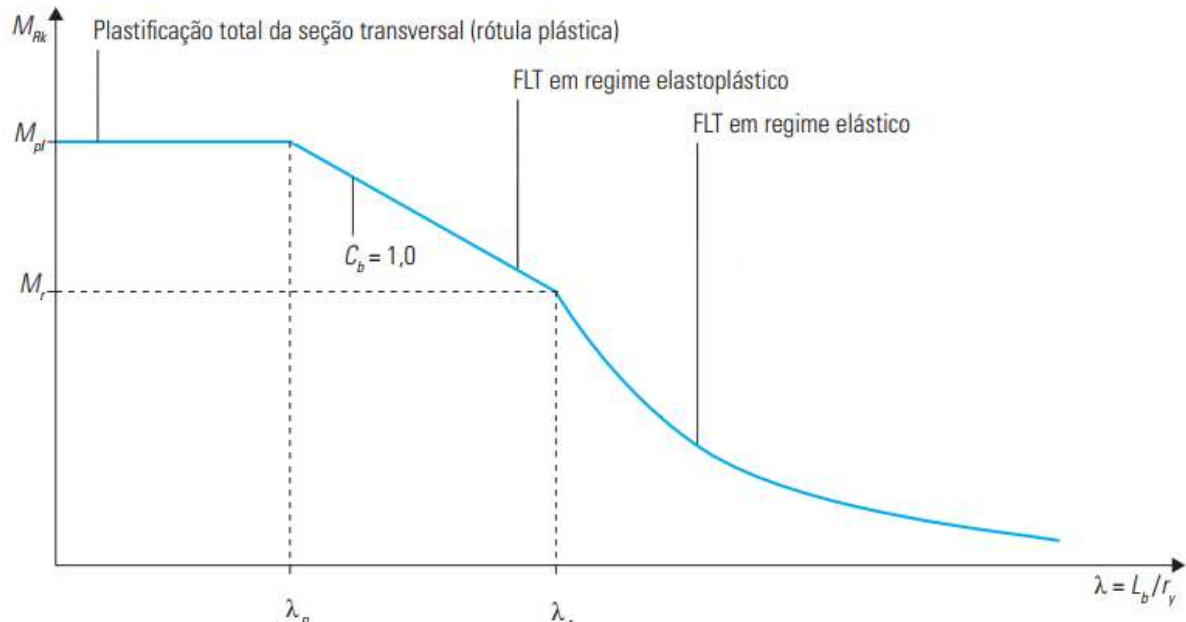
Os estados-limites últimos em vigas de aço de perfil I decorrentes de momento fletor são a flambagem local da mesa comprimida (FLM), a flambagem local da alma parcialmente comprimida (FLA) e a flambagem lateral com torção (FLT). Já os estados-limites de serviço são as flechas excessivas e vibrações inaceitáveis (SILVA, 2017).

Assim, se as cargas atuantes em uma estrutura, quando combinadas de acordo com as especificações normativas, excederem um ou mais estados-limites também normativos, a estrutura não atende aos objetivos de projeto (ABNT, 2008). Porém, se nenhum estado-limite último for atingível, ou seja, em situações onde o parâmetro de esbeltez é menor que a esbeltez limite para seções compactas, ocorre a plastificação total de uma ou mais seção, caracterizando o colapso por formação de rótulas plásticas.

O Gráfico 1, apresenta no eixo horizontal o parâmetro de esbeltez da viga, λ , pelo momento resistente característico, M_{RK} , no eixo vertical. Assim, conforme mencionado acima, se a esbeltez for menor que o parâmetro de esbeltez limite para seções compactas, o colapso se dá no regime plástico, ou seja, ocorre a plastificação total da seção transversal (formação de rótula plástica). Para a esbeltez com valor entre os parâmetros de esbeltez limites para seções

compactas e semicompatas, λ_p e λ_r , a flambagem lateral com torção se dá em regime elastoplástico. Por fim, nos casos onde λ é maior que λ_r , a FLT ocorre em regime elástico.

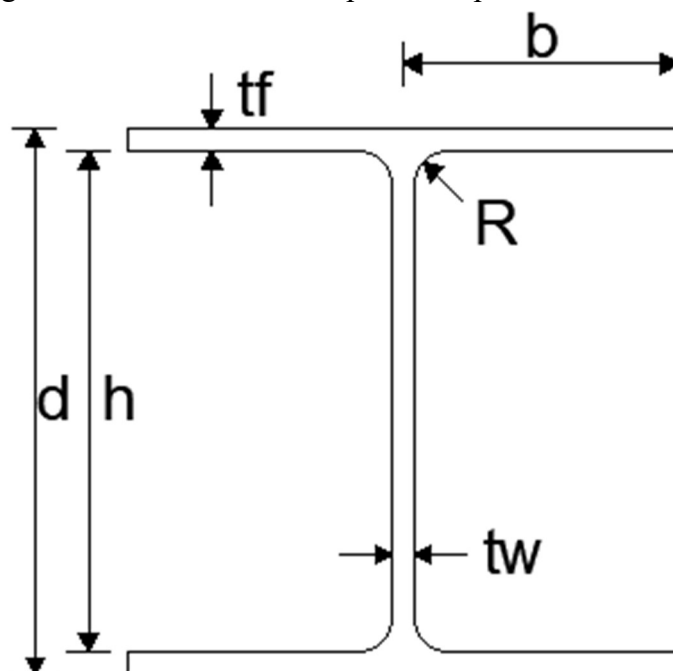
Gráfico 1 - Momento fletor resistente nominal para FLT de perfis I fletidos em relação a x com C_b igual a 1,0.



Fonte: Adaptado de FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

Para melhor identificar os parâmetros geométricos que serão citados abaixo, a Figura 7 traz a seção transversal de um perfil I duplamente simétrico, com as indicações das suas dimensões.

Figura 7 - Dimensões de um perfil I duplamente simétrico



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

2.1 Esbeltez da alma

A alma da seção transversal de um perfil I é considerada não esbelta quando o parâmetro de esbeltez da alma (λ_w), dado pela Equação (1), é menor ou igual ao o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento ($\lambda_{w,r}$), conforme Equação (2), e de alma esbelta aquelas de situação contrária, com:

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} \quad (1)$$

$$\lambda_{w,r} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2)$$

onde:

h : altura da alma;

t_w : espessura da alma;

E : módulo de elasticidade do aço;

f_y : resistência ao escoamento do aço.

De acordo com a ABNT (2008), o módulo de elasticidade do aço pode ser tomado igual a 200.000 MPa. No presente trabalho, os modelos de viga serão projetados com alma não esbelta respeitando o limite do parâmetro de esbeltez de 120.

2.2 Esbeltez da mesa

O parâmetro de esbeltez da mesa, λ_f , é dado pela razão entre a metade da largura total da mesa do perfil I, b , e a espessura da mesa, t_f , conforme Equação (3).

$$\lambda_f = \frac{b}{t_f} \quad (3)$$

No presente trabalho, foram analisados modelos de viga com parâmetro de esbeltez da mesa de 3, de 6,25 e de 9.

2.3 Flambagem lateral com torção

O procedimento apresentado pela ABNT NBR 8800:2008 para o estado-limite da FLT em regime elástico linear se encontra no Anexo G da referida norma, que apresenta expressões analíticas consideravelmente simples para o cálculo e análise estrutural.

Algumas situações comuns em cenários reais são desprezadas para garantir essa simplificação, dentre elas o uso de diferentes condições de vinculação, a posição de aplicação das cargas e a possível ocorrência de flambagem local simultaneamente à ocorrência de

flambagem global, caso em que se verifica a distorção da alma na flambagem lateral com torção (ROSSI, 2018).

O momento fletor resistente de cálculo para o estado-limite de flambagem lateral com torção, entre seções contidas lateralmente, não pode ser inferior ao momento fletor solicitante de cálculo da seção onde ocorre a maior tensão de compressão nas mesas.

Para obter o momento fletor resistente de cálculo para o ELU de FLT com seções I de almas não esbeltas, tem-se, para cada caso descrito, as Equações (4), (5) e (6)

Para $\lambda \leq \lambda_p$ não ocorre flambagem lateral com torção:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (4)$$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ a flambagem ocorre em regime inelástico:

$$M_{Rd} = \frac{c_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

Para $\lambda > \lambda_r$ a flambagem ocorre em regime elástico:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (6)$$

com:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (7)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (8)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (9)$$

$$M_{cr} = \frac{c_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \leq M_{pl} \quad (10)$$

$$M_{pl} = f_y Z \quad (11)$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W \quad (12)$$

A tensão residual de compressão nas mesas, σ_r , deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento, f_y .

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E J} \quad (13)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (14)$$

onde:

L_b : a distância entre duas seções contidas lateralmente;

C_b : o fator de modificação para diagramas de momento fletor não-uniformes, conforme Equação (15);

C_w : a constante de empenamento da seção transversal;

β_1 : coeficiente de correção para a esbeltez crítica;

J : o momento de inércia à torção uniforme;

I_y : o momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

M_{cr} : o momento fletor de flambagem elástica;

M_{pl} : momento fletor de plastificação da seção;

M_r : momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo tensões residuais;

γ_{a1} : coeficiente de ponderação da resistência do aço;

r_y : raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

λ : parâmetro de esbeltez;

λ_p : parâmetro de esbeltez limite para seções compactas;

λ_r : parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas;

W : módulo de resistência elástico da seção, relativo ao eixo de flexão;

Z : módulo de resistência plástico da seção;

d : altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

R : raio de concordância entre a mesa e a alma;

t_f : espessura da mesa;

σ_r : tensão residual de compressão nas mesas igual a $0,3f_y$.

Quando os momentos fletores atuantes em duas seções contidas lateralmente diferem-se, é necessário calcular um fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme C_b , para determinar o momento fletor resistente de cálculo, conforme Equação (15).

$$C_b = \frac{12,5 M_{m\acute{a}x}}{2,5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3,0 \quad (15)$$

onde:

$M_{m\acute{a}x}$: valor do momento máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

M_A : valor do momento solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda;

M_B : valor do momento solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

M_C : valor do momento solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda;

R_m : parâmetro de monossimetria da seção transversal, para seções com um eixo de simetria; para seções duplamente simétricas $R_m = 1,0$.

Entretanto, quando o diagrama de momento fletor for uniforme ao longo da viga, C_b é igual a 1,0, mínimo valor que representa a pior situação.

Como o momento fletor que provoca a flambagem lateral com torção é o momento crítico elástico, M_{cr} , apenas esse valor será comparado no presente estudo.

Destaca-se que, a Equação (10) não leva em consideração a flexão que ocorre na alma durante a FLT, o que demonstra que para o cálculo do momento resistente à flambagem lateral com torção, o procedimento normativo brasileiro não considera esse fenômeno (SILVA, 2017).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O aço como material estrutural na construção civil

O uso do aço na construção civil começou por volta de 1750, mas só em 1780 ele foi usado na França como elemento estrutural em obras como a escadaria de Louvre e o Teatro do Palais Royal (BELLEI, 2010).

Ainda segundo o autor, o uso do aço nas obras brasileiras começou a crescer após a Companhia Siderúrgica Nacional criar a Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM), a partir da qual surgiu um grande número de fabricantes, projetistas, desenhistas e outros profissionais do ramo.

FAKURY, SILVA e CALDAS (2016), PRAVIA, FICANHA e FABEANE (2013), BELLEI (2010) e PINHEIRO (2005) citam como principais vantagens do uso do aço estrutural a alta precisão e controle de qualidade do produto acabado, a resistência do material a vibrações e choques, a possibilidade de obras limpas, secas e mais rápidas, a viabilidade de dimensões menores dos elementos, a maior facilidade de realizar reforços e ampliações e o fato de possuir produção sustentável, o que permite o reaproveitamento e reciclagem dos produtos.

As obras são mais rápidas com o uso de estruturas metálicas, podendo apresentar redução de 40% no tempo de execução, quando comparado a outros processos construtivos, já que é composta de peças pré-fabricadas e com dimensões precisas (LIMA, 2018 apud FREITAS e COELHO, 2018). Além disso, como não utilizam formas e escoramentos, não exigem grandes espaços para o canteiro de obras e para estoque, contribuindo com a otimização do canteiro, com a limpeza, organização e ausência de entulhos (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

Ele também garante a abordagem ecológica, tão discutida atualmente, já que permite o reaproveitamento de materiais que estejam em boas condições ou mesmo as sobras de obra (NAKAHARA, 2017). Também permite a reciclagem, uma vez que ao findar a sua vida útil, o aço é transformado em sucatas que podem ser aproveitadas na produção de novos produtos siderúrgicos (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

A procura por materiais mais resistentes acontece pelo interesse em estruturas mais leves e esbeltas principalmente do ponto de vista arquitetônico. Entretanto, os fatores de segurança utilizados nos cálculos estruturais devem ser menores a fim de garantir mais competitividade no mercado (SILVA, 2009).

O aço é o material que apresenta a maior relação entre resistência e peso específico. Por consequência, para atingir um determinado nível de resistência, o seu uso permite implantar elementos estruturais com menores dimensões que outros materiais e com capacidade de vencer

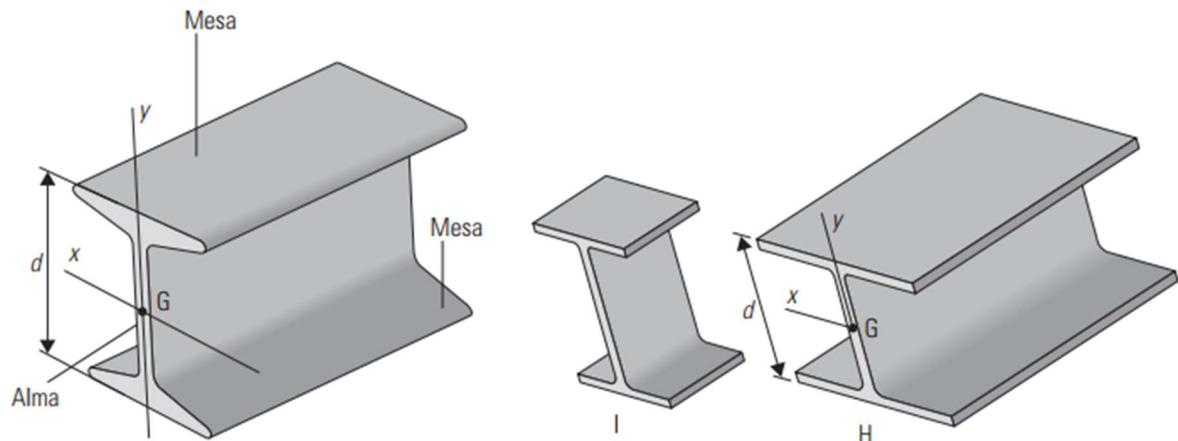
grandes vãos (ALMEIDA, 2017). Diante disso, os arquitetos têm maior possibilidade de criação, já que podem trabalhar com peças mais esbeltas além de descarregar menor carga sobre as fundações.

Os perfis metálicos podem ser soldados ou laminados. O primeiro é obtido por um processo de soldagem de dois ou mais perfil laminados, enquanto que o segundo é obtido por laminação, onde a peça passa por cilindros que moldam o corpo metálico até atingir a forma desejada para a sua aplicação (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

Dentre as seções transversais padronizadas, a mais utilizada é o perfil I, formado pela laminação a quente na usina siderúrgica. Ele pode receber a nomenclatura W seguida da altura e da massa por metro, por exemplo W 460x144 significa que o perfil possui 460 mm de altura nominal e 144 kg/m (SALMON, JOHNSON e MALHAS, 2009).

As faces das mesas do perfil podem ser inclinadas ou paralelas, conforme pode ser visualizado na Figura 8, respectivamente na ordem que se apresentam.

Figura 8 - Perfil I de face inclinada e perfis I e H de faces paralelas



Fonte: Adaptado de FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

O uso dos perfis com seção I de faces paralelas é oportuno em peças estruturais sob solicitação de flexão simples com relação ao eixo de maior momento de inércia, x , já que apresentam momento de inércia em relação ao eixo y relativamente pequeno (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

As seções transversais das vigas metálicas podem ser classificadas, de acordo com a ABNT (2008) em compactas, semicompactas e esbeltas, dependendo do parâmetro de esbeltez, λ , dos componentes comprimidos. A classificação segue as seguintes determinações:

- compactas: elementos comprimidos possuem $\lambda \leq \lambda_p$ e as mesas são ligadas à alma ao longo de todo o seu comprimento;

- semicompactas: um ou mais elementos comprimidos com $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$;
- esbeltas: um ou mais elementos comprimidos com $\lambda_r < \lambda$.

onde:

λ_p : parâmetro de esbeltez limite para seções compactas, e

λ_r : parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas.

Os parâmetros de esbeltezes são definidos pela relação entre largura e espessura (b/t) de cada um dos componentes das seções transversais.

As vigas podem apresentar, ainda, diversos tipos de restrições nas suas extremidades e, segundo SILVA (2017), comumente na prática, elas se encontram com restrições denominadas “vínculo rígido” ou ainda com restrições características do “vínculo de garfo”.

3.2 Método dos Elementos Finitos

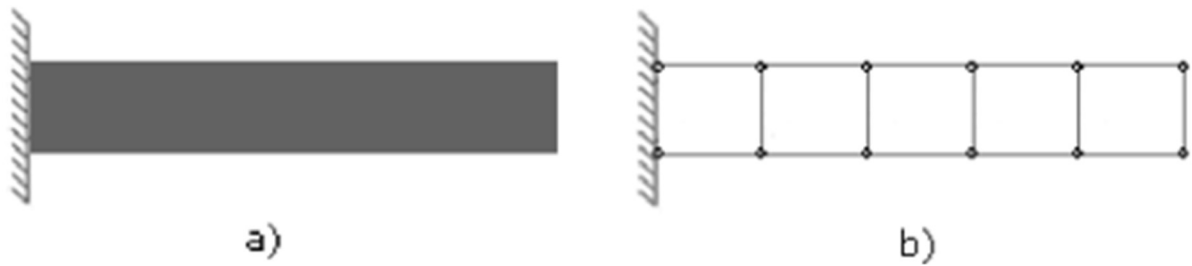
Segundo FERREIRA *et al.* (2015), o surgimento do Método dos Elementos Finitos (MEF) se deu pela necessidade de se desenvolver procedimentos aceitáveis, dentro dos limites de engenharia, que pudessem ser aplicados para qualquer forma de estrutura e qualquer tipo de carregamento.

O MEF divide o domínio das soluções por elementos de forma simples, que podem ser segmentos de reta, triângulos, quadriláteros, tetraedros, etc. Assim, são encontradas e juntadas as soluções aproximadas para as equações diferenciais de cada elemento, montando a solução da equação original, se atentando para garantir a continuidade das fronteiras dos elementos (AZEVEDO, 2003; CHAPRA E CANALE, 2011). Ele caracteriza-se, então, como um procedimento que busca resolver problemas regidos por equações diferenciais para a obtenção de soluções aproximadas com a discretização da estrutura contínua (CUNHA, 2012).

Na Figura 9-a têm-se a caracterização de uma viga contínua, enquanto que a Figura 9-b caracteriza a viga discreta, com elementos de número finito de nós, e cada nó com seus graus de liberdade pré-determinados.

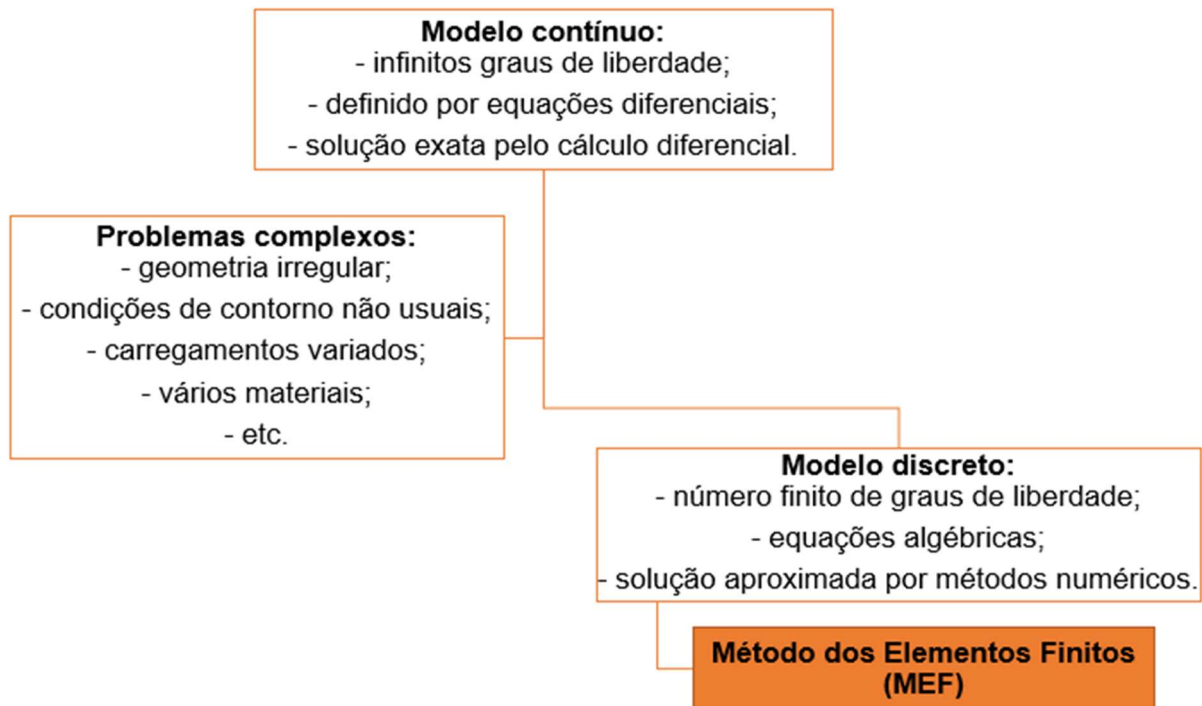
Já na Figura 10 é mostrado um diagrama para simplificar o entendimento do princípio de resolução de problemas por métodos aproximados.

Figura 9 - Viga contínua e discreta



Fonte: FILHO, 2011.

Figura 10 - Princípio de resolução de métodos aproximados

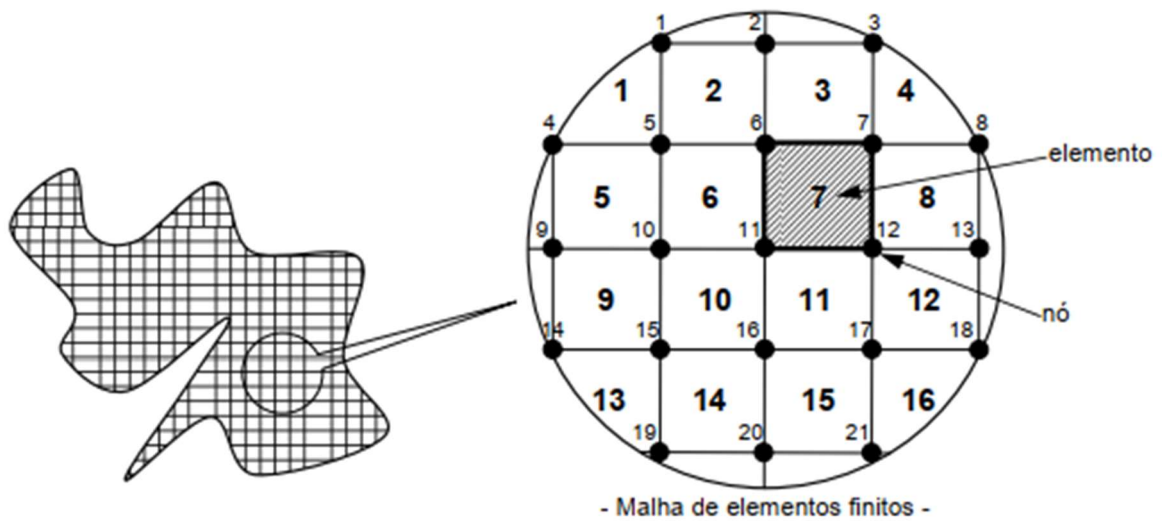


Fonte: Adaptado de CUNHA, 2012.

A divisão do elemento geométrico em diversos subdomínios é o que caracteriza a malha de elementos finitos, sendo os subdomínios os elementos, e os nós os pontos nos vértices de cada elemento que os conectam uns aos outros. Na Figura 11, pode-se observar uma placa com geometria irregular, cuja solução aproximada é alcançada pela sua divisão em diversas placas retangulares com geometria simples e solução conhecida.

A solução para cada elemento é obtida em função dos valores nodais, que em geral, nos problemas de estática, as incógnitas são as translações e rotações dos nós. Após encontradas as soluções para cada subdomínio, com base nos deslocamentos conhecidos, são usadas funções interpoladoras para determinar o comportamento dos demais pontos da geometria original (FILHO, 2011).

Figura 11 - Configuração da malha de elementos finitos

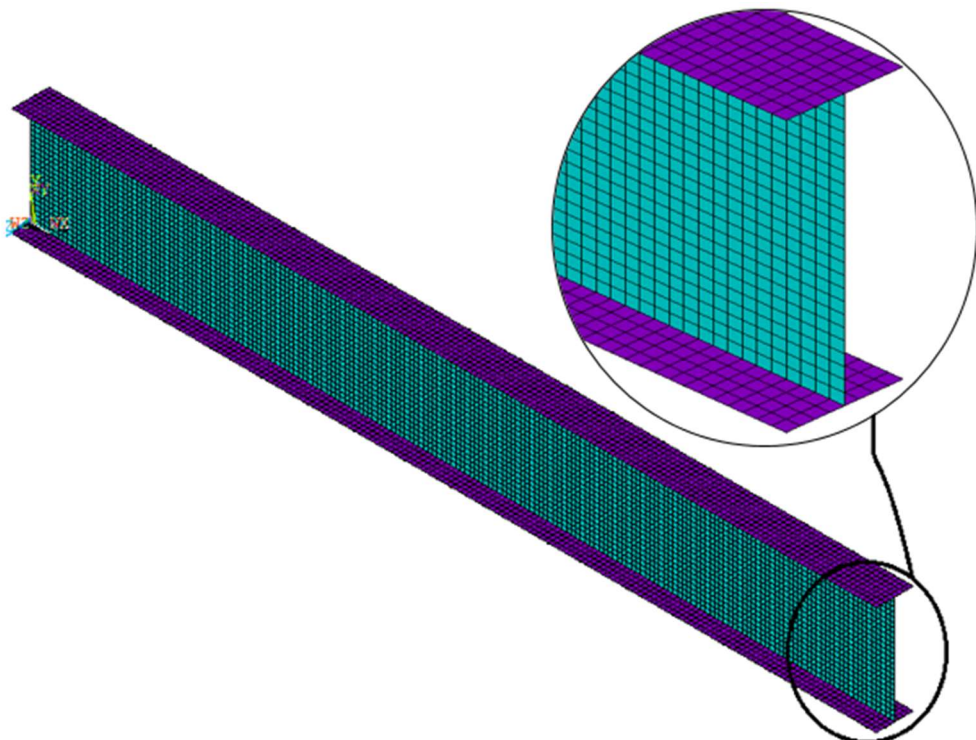


Fonte: CUNHA, 2012.

De acordo com VELLASCO *et al.* (2014), ao simular um problema com um modelo numérico, sempre é possível chegar a um resultado. Entretanto, a confiabilidade desses resultados só é garantida a partir da calibração do modelo, que pode ser feita com a comparação com experimentos práticos, a partir da convergência de resultados obtidos pela análise ou ainda com resultados conhecidos por formulações teóricas (resultados analíticos, por exemplo).

A Figura 12 mostra a discretização de uma viga de perfil I analisada no presente estudo, com um detalhe da malha de elementos finitos com elemento *SHELL181*.

Figura 12 - Discretização de uma viga de perfil I com elementos *SHELL181*



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Esse método (MEF), é comumente empregado em *softwares* de análise estrutural por meio de linguagens de programação, de forma que viabiliza diversos modos de análises complexas ou inviáveis de serem feitas manualmente (CASTRO, 2018).

3.3 ANSYS

A flambagem lateral com torção é um modo de instabilidade complexo e é influenciado por diversos fatores, nem sempre previstos nas normativas de projeto de estruturas metálicas. Por isso, para se obter o momento resistente à FLT, pode ser necessária uma análise numérica computacional precisa, garantindo a abordagem de todos os parâmetros mecânicos e geométricos que envolvem o comportamento real da estrutura analisada (SILVA, 2017).

O *ANSYS* é um programa oferecido pela companhia ANSYS® Inc. e foi criado para resolver problemas mecânicos com a modelagem de elementos finitos (LILLEY *et al.*, 2001).

A plataforma *ANSYS* possibilita sete tipos de análises estruturais: estática, de flambagem, modal, harmônica, dinâmica e espectral. Dentre as diversas versões existentes, as que abordam as análises de estrutura são: *ANSYS Multiphysics*, *ANSYS Mechanical*, *ANSYS Structural* e *ANSYS Professional* (ABREU, 2016). No presente trabalho foi utilizada a versão *ANSYS Mechanical*.

A família *ANSYS Mechanical APDL* inclui ainda o *ANSYS Mechanical Enterprise*, o *ANSYS Mechanical Premium* e o *ANSYS Mechanical Pro*, além de versões destinadas ao uso acadêmico. A biblioteca de elementos, materiais e produtos do *ANSYS* estão sempre em constante atualização (THOMPSON e THOMPSON, 2017).

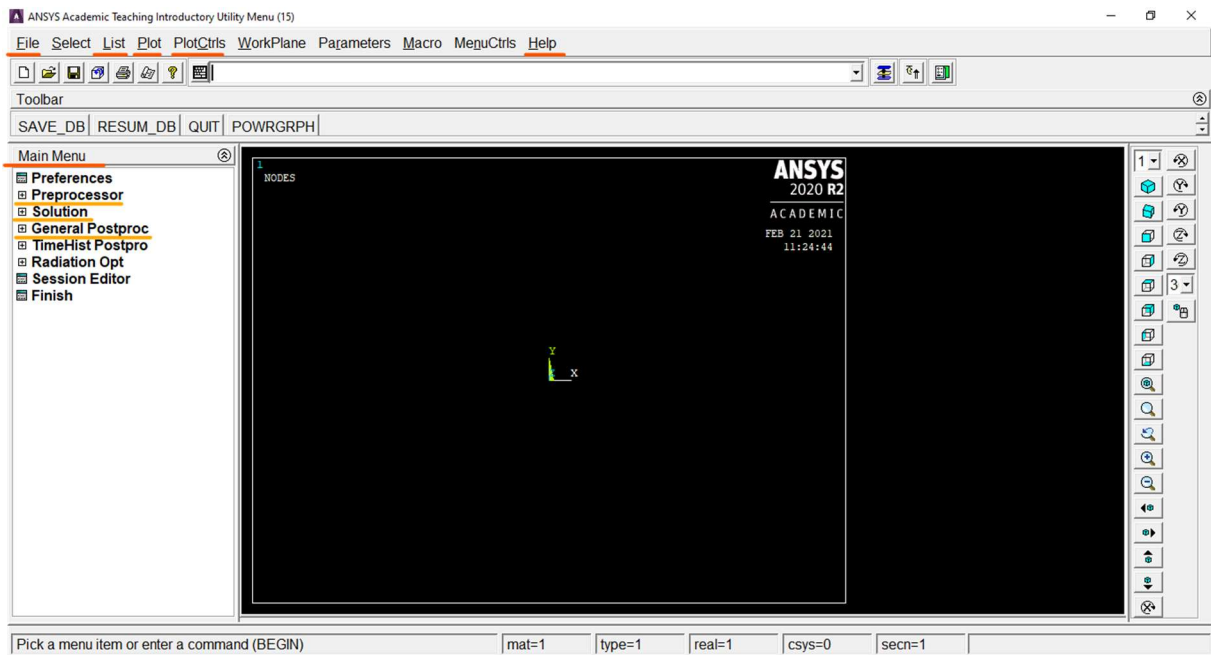
Existem três formas de análise pelo *ANSYS Mechanical APDL*, via menus da Interface Gráfica do Usuário (*GUI*), via arquivos de comando e via arquivo nome.db, onde “nome” representa uma nomenclatura genérica e “.db” é a extensão do arquivo.

3.3.1 Interface gráfica do usuário (*GUI*)

A análise pelo *ANSYS* pode ser lançada através do *Main Menu*, que contém as funções básicas do programa, onde são acessadas de maneira direta as áreas de operações: *preprocessor*, *solution* e *general postproc*. Também existem os menus superiores, cujos mais utilizados são: *File*, *List*, *Plot*, *PlotCtrls* e *Help*.

A Figura 13 traz a tela principal do programa na versão acadêmica, onde são destacados os menus citados acima.

Figura 13 - Interface Gráfica do Usuário do *Ansys Mechanical APDL* versão acadêmica



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

No menu *File*, são encontrados comandos como limpar cálculos feitos, iniciar um novo cálculo, salvar e carregar dados e cálculos e executar um arquivo de comando.

Na aba *List* é possível solicitar a listagem dos pontos, linhas, áreas, volumes, nós, elementos, propriedades, carregamentos e resultados.

No menu *Plot*, o programa coloca na tela os elementos definidos pelo usuário, como por exemplo as linhas e áreas do modelo, ou ainda os resultados obtidos pela análise.

Por fim, na seção *PlotCtrls* são acessadas as preferências de visualização como numeração, símbolos, estilo, animação, etc.

O lançamento de problemas no *software* pela GUI pode levar um tempo dispendioso, principalmente problemas mais complexos ou de situações onde serão variados dados de entrada e feito maior número de análises, como é o caso do presente trabalho. Sendo assim, é importante o conhecimento básico da linguagem de programação *APDL* de maneira a facilitar o processo de pesquisa.

No *Help* do *ANSYS* são descritos e detalhados todos os comandos existentes no programa, bem como as exigências de utilização de cada um, além de possuir todos os seus manuais de usuário. Sendo assim, esse menu é uma importante ferramenta de aprofundamento não só do *software* como da linguagem *APDL*.

3.3.2 *Ansys Parametric Design Language*

A linguagem de programação *APDL*, de acordo com LIMA (2009), possui recursos similares a qualquer outra linguagem (PASCAL, C++, FORTRAN, etc), como a declaração de variáveis, execução de laços, decisões lógicas, atribuição de valores, operadores matemáticos e funções paramétricas. Além de diversos comandos gerais, existem ferramentas próprias para cada uma das três principais áreas de operações do *software* (pré-processamento, processamento e pós-processamento).

O pré-processamento é o local onde encontram-se os comandos de criação e seleção de entidades geométricas, aplicação de carregamentos e condições de contorno, definição de materiais, tipos de elementos e criação de malha. No *script*, trabalha-se com os comandos de pré-processamento após sinalizar para o programa a entrada “/prep7”.

O tipo de análise a ser efetuada é definido na etapa de processamento, onde também o modelo é efetivamente resolvido, e a entrada que a sinaliza é “/solution”. Quando a solução é concluída, o *software* encontrou os deslocamentos nodais e as reações de apoio (FILHO, 2011).

Finalmente, com a entrada “/post1”, executa-se a área de pós-processamento, onde os resultados podem ser acessados e analisados. As ações de interesse nessa área dividem-se em plotagem ou impressão de resultados na própria tela, geração de gráficos dos resultados (variável x variável) e impressão dos resultados em arquivo de texto.

Essas três áreas principais para a execução do problema, além de serem acessadas pela linguagem de programação através do *script*, também podem ser acessadas pelo *ANSYS Main Menu* selecionando os comandos dispostos.

3.3.3 *Script*

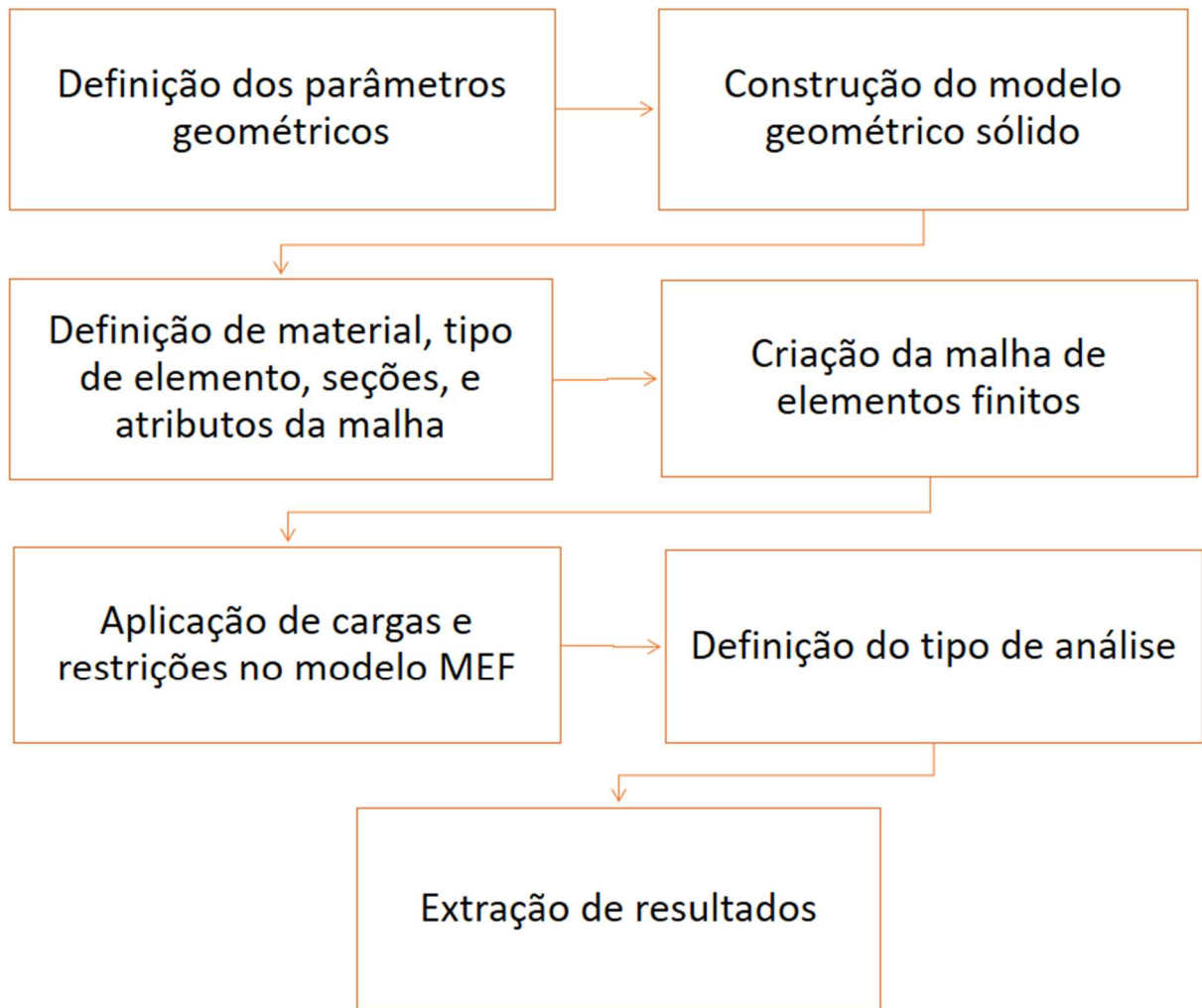
CUNHA (2012) cita algumas etapas básicas para se desenvolver um roteiro de comandos de um modelo, a começar por definir qual será o tipo de elemento utilizado (viga, placa, sólido, etc.). Também devem ser definidas as propriedades mecânicas do material, como as propriedades físicas e elásticas e as propriedades geométricas do modelo, como área e inércia da seção transversal, comprimento da viga, etc. Após a determinação das características do modelo estudado, é possível modelar o problema com a malha de elementos finitos.

Faz-se, então, a aplicação das forças atuantes na estrutura e das condições de contorno, especialmente a determinação dos tipos de apoio. Com o problema estrutural desenhado, define-se o cálculo que será efetuado, ou seja, o tipo de análise estrutural (estática,

dinâmica, flambagem, etc.) e finalmente pode-se listar, plotar ou exportar os resultados obtidos pelo *software*.

A Figura 14 esquematiza as principais etapas consideradas na criação de um *script* para análise estrutural no *software ANSYS Mechanical APDL*.

Figura 14 - Esquema de etapas para criação de um *script*



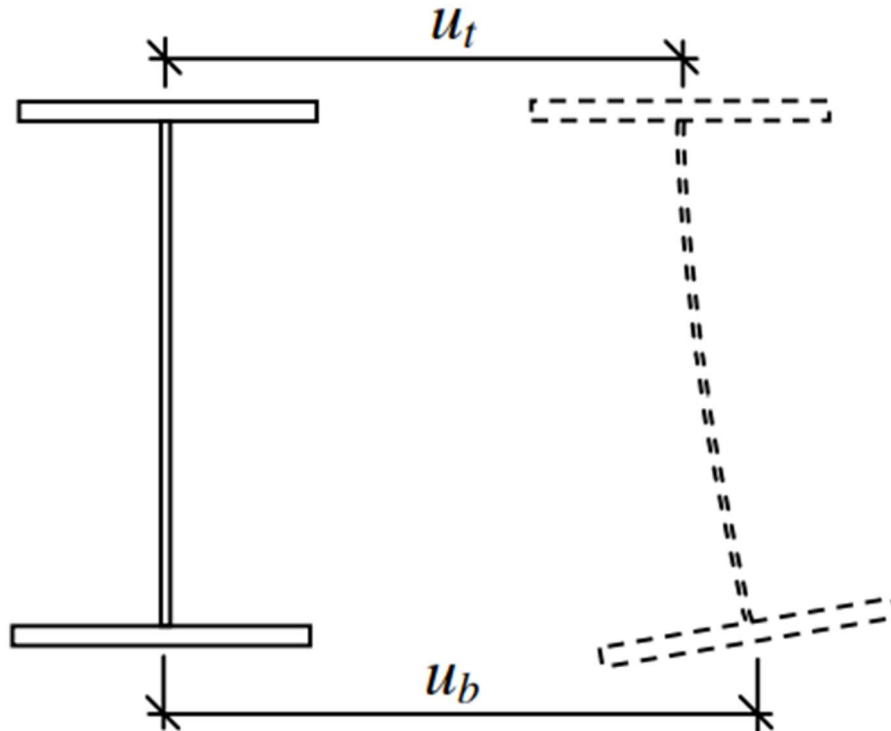
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Após a elaboração do *script*, pode-se realizar o lançamento no *Prompt* de comandos de forma integral ou de maneira particionada, a fim de conferir as etapas da modelagem. Também pode ser aberto o arquivo de texto pelo menu “*File – Read Input from...*” e processá-lo completamente.

3.4 Distorção da alma

A alma da viga, durante a FLT, pode sofrer flexão lateral (Figura 15), fenômeno conhecido como distorção da alma. Isso pode provocar influência no momento crítico elástico de flambagem lateral e conseqüentemente gerar redução do momento resistente (SILVA, 2017).

Figura 15 - Flambagem lateral com torção e distorção na alma



Fonte: KURNIAWAN e MAHENDRAN, 2011 (apud AHNLEN e WESTLUND, 2013).

A flambagem lateral com torção e distorção da alma (FLTDA), ou flambagem distorcional (FD) pode ocorrer em vigas que possuam a alma flexível, ou seja, sempre que não apresentar restrições a esse efeito (AHNLEN e WESTLUND, 2013).

Segundo SAITO, ROSSI E MARTINS (2019), ROSSI (2018) e SILVA (2017), a norma brasileira de projeto de estruturas metálicas ABNT NBR 8800:2008, em suas expressões analíticas para o momento crítico elástico, não considera todos os parâmetros e premissas da flambagem lateral com torção, dentre eles a distorção da alma, devido à complexidade desse fenômeno. Porém, essa flexão na alma pode ser observada em análises numéricas processadas por *softwares* que utilizam o Método dos Elementos Finitos.

Em um estudo feito por SILVA (2017), verificou-se que diversos trabalhos investigaram a influência da distorção da alma na FLT e que chegaram a resultados que indicam que, para a determinação do momento crítico elástico, ela aumenta à medida que se aumenta o parâmetro de esbeltez da alma, se reduz o comprimento destravado da viga e se diminui a esbeltez das mesas.

3.5 Tipos de análises

A análise estrutural tem por objetivo a obtenção das respostas da estrutura a uma combinação de ações. As respostas estruturais são tensões e esforços solicitantes, quando

usadas para verificação dos ELU, e deslocamentos quando verificados os ELS (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

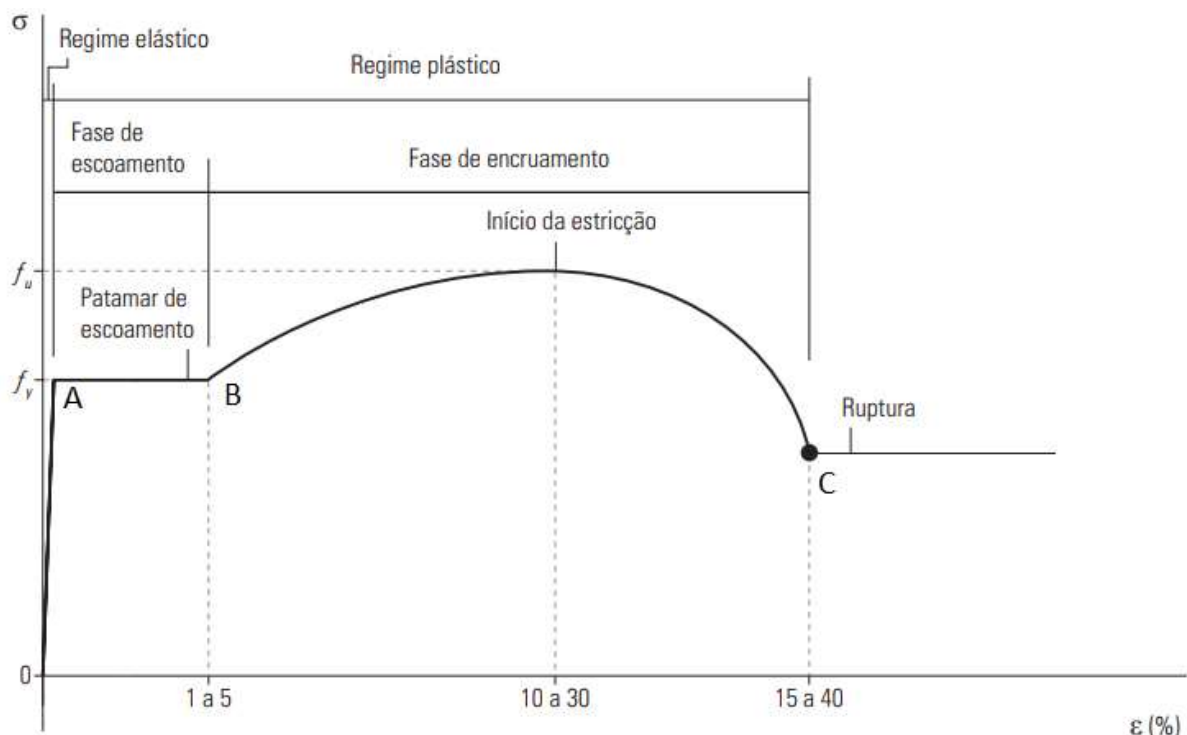
A ABNT (2008), na norma NBR 8800:2008, classifica a análise estrutural de duas formas, com relação ao material e ao deslocamento da estrutura.

A segunda classificação, com relação ao efeito dos deslocamentos, os esforços internos são determinados a partir de análise linear ou não-linear. Sendo linear a análise que considera a geometria indeformada da estrutura, e a não-linear aquela com base na geometria deformada.

A análise não-linear deve ser adotada quando os efeitos dos deslocamentos sobre os esforços internos forem significativos.

Com relação aos materiais, a norma agrupa as análises em elástica e plástica. A análise elástica permite a obtenção dos esforços internos a partir do diagrama tensão-deformação elástico-linear, situado no primeiro trecho (0A) do diagrama contido na Figura 16. Já a análise plástica refere-se aos trechos AB e BC do diagrama (ABNT,2008).

Figura 16 - Diagrama simplificado de tração *versus* deformação dos aços estruturais



Fonte: Adaptado de FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

Segundo FAKURY, SILVA E CALDAS (2016), o regime elástico é caracterizado pelo trecho reto (0A), já que o aço obedece a lei de Hooke ($\sigma = E_a \cdot \varepsilon$), o que indica relação de linearidade entre as tensões (σ) e as deformações (ε). O módulo de elasticidade do aço (E_a ou apenas E) é uma constante cujo valor pode ser considerado igual a 200.000 MPa.

Ainda segundo o autor, em regime elástico, as deformações que ocorrem no elemento estrutural não são permanentes, ou seja, o carregamento ocorre no mesmo sentido do carregamento e as deformações desaparecem. O regime plástico se inicia quando a tensão atinge a resistência ao escoamento (f_y) e engloba as fases de escoamento e de encruamento.

Após o escoamento, trecho em que a deformação atinge valores consideráveis, o aço sofre um rearranjo cristalino, provocando um novo crescimento da tensão, porém sem relação linear com a deformação. Na fase de encruamento, o aço atinge a tensão máxima, chamada resistência à ruptura (f_u) e então, com a redução rápida da área da seção transversal (estricção), ocorre a ruptura do elemento. No regime plástico, o descarregamento ocorre em reta paralela ao regime elástico, restando deformações residuais (ϵ_r) (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

No presente trabalho o aço foi considerado como material linear, com coeficiente de Poisson em regime elástico de 0,3.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Considerações gerais

Para comparar os resultados da flambagem lateral com torção dos procedimentos de cálculo da ABNT NBR 8800:2008 com os resultados do *ANSYS*, foram processados modelos numéricos com o uso do *script* contido no APÊNDICE A e lançados no programa através do *Command Prompt*.

Aqui serão apresentados os modelos analisados, bem como suas informações, tais como elemento utilizado, características geométricas, condições de contorno e de carregamento, etc.

4.2 Vigas analisadas

Os modelos são constituídos por uma viga de perfil I duplamente simétrico de alma não esbelta, fletida em relação ao eixo perpendicular à alma, que segundo FAKURY, SILVA E CALDAS (2016) é a situação mais usual real.

Dentre os tipos de vinculação abordados pela norma, optou-se por aplicar restrições que permitam simular o vínculo de garfo nas duas extremidades, que apresentam características de condição de contorno encontradas na prática (SILVA, 2017). Além disso, o comprimento destravado foi tomado, em todos os casos, igual ao comprimento do vão.

As análises possuem o objetivo de encontrar o valor do momento crítico elástico, sendo este o que provoca a flambagem lateral com torção. Por isso, as mesas inferior e superior foram submetidas a solicitações paralelas ao eixo longitudinal da viga, de forma a gerar momento fletor uniforme, e encontravam-se livres para se deslocar lateralmente.

Fez-se o estudo com análise elástica linear, visto que o material é considerado com comportamento elástico-linear e os efeitos são considerados sobre a geometria original, ou seja, indeformada.

4.3 Elemento utilizado

Para a discretização de uma geometria em subdomínios, deve-se escolher o tipo de elemento que será utilizado na análise. Com relação a geometria, os elementos podem ser pontuais (massa concentrada, conexão), unidimensionais (treliça, viga, cabo), bidimensionais (membrana, casca, placa) e tridimensionais (sólidos) (CUNHA, 2012).

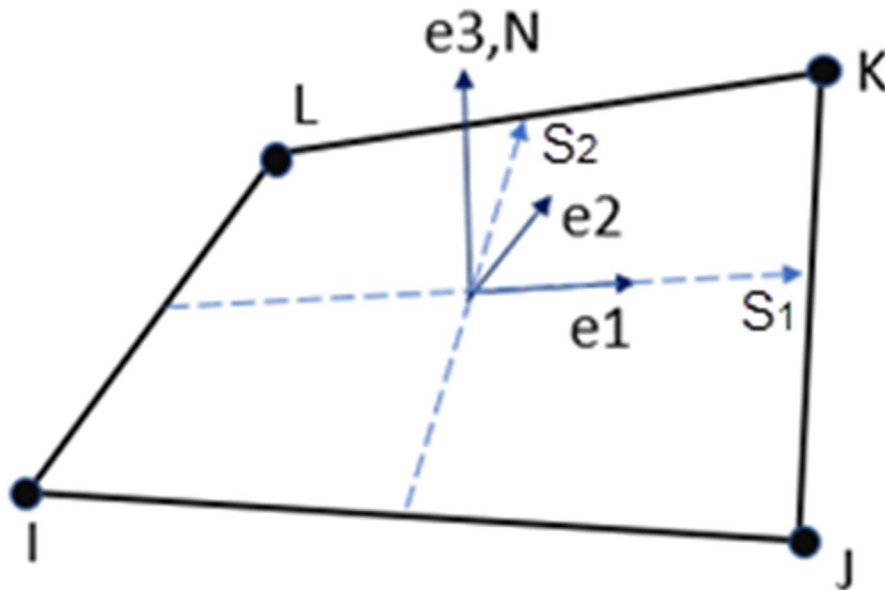
O programa *ANSYS* possui centenas de tipos de elementos, e a escolha deles é feita conforme as possibilidades de geometria e de análise que cada um oferece.

O elemento utilizado nas mesas e na alma foi o *SHELL181*, elemento de casca indicado para análises de casca fina ou moderadamente espessas, do tipo linear, de grandes rotações ou grandes deformações não lineares, e é baseado na teoria de Reissner-Mindlin. Possui quatro nós com seis graus de liberdade cada um, translação nas três direções (x , y e z) e rotação em torno dos eixos x , y e z (ANSYS, INC, 2020).

Segundo DIAS (2018), o uso de elementos de casca possibilita grande precisão nas soluções quando é analisado o fenômeno da distorção da alma. Para que ocorra a distorção é essencial que o elemento se distorça, não obtendo esse efeito utilizando-se elementos de placa, viga, ou outros que não permitam grandes deformações.

A Figura 17 contém um elemento *SHELL181*, com seu sistema de coordenadas único localizado no centro do elemento.

Figura 17 - Elemento *SHELL181*



Fonte: ANSYS, INC, 2020.

Foram definidas três áreas, sendo duas para as mesas e uma para a alma. Tal configuração é explicada na seção 4.6. Através dos atributos e da criação das seções, foram definidas as espessuras de cada área.

4.4 Refinamento da malha

Quanto mais se refina a malha, maior será o número de nós e elementos contidos no problema, o que reflete em maior número de equações a serem resolvidas. Para resolver

grandes quantidades de equações, o custo computacional se eleva, e conseqüentemente o tempo de cálculo é maior. Sendo assim, o grau de refinamento da malha de elementos finitos deve considerar o custo computacional e a precisão requerida (CUNHA, 2012).

A fim de definir o tamanho da malha de elementos finitos que fosse suficientemente preciso e com bom tempo de processamento, fez-se o refinamento da malha através do lançamento de um modelo de viga padrão no *Ansys Mechanical APDL* variando apenas o tamanho do elemento finito. As características geométricas do modelo são mostradas na Tabela 1.

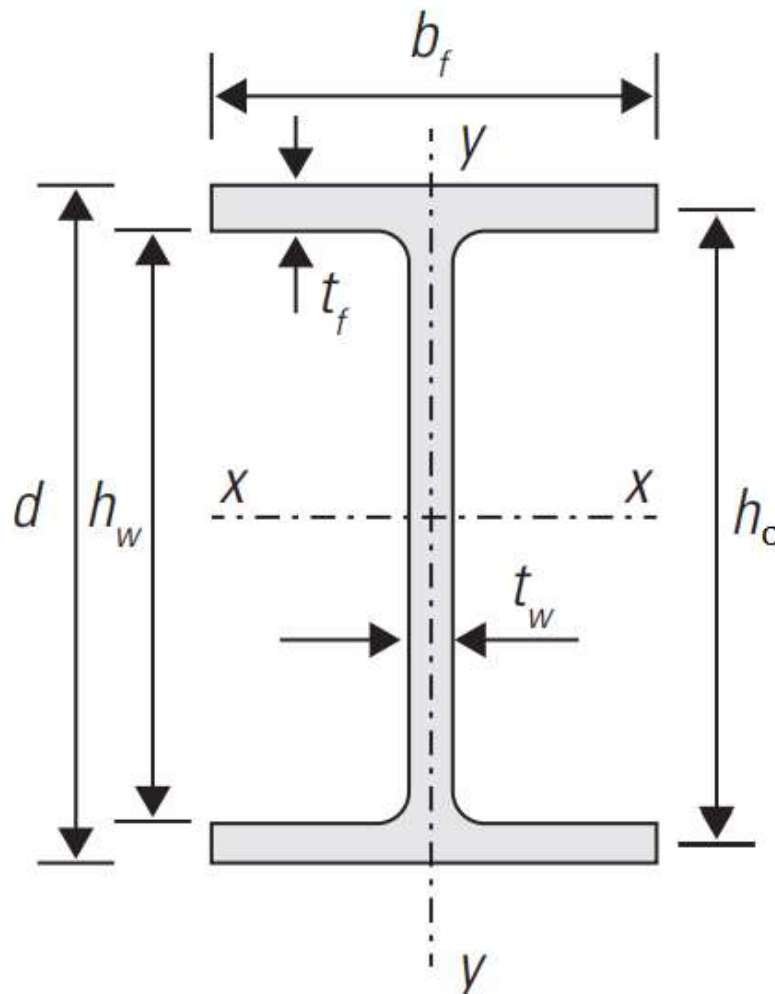
Tabela 1 - Características geométricas da viga padrão para refinamento da malha

NOME	l (cm)	d (cm)	h _w (cm)	h _o (cm)	b _f (cm)	t _f (cm)	t _w (cm)
Padrão	1000	60,0	56,8	58,4	20,0	1,6	1,25

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

As dimensões descritas acima são detalhadas na Figura 18. E “l” é o comprimento longitudinal da viga (igual ao comprimento destravado).

Figura 18 - Dimensões de um perfil I com dupla simetria



Fonte: Adaptado de FAKURY, SILVA E CALDAS, 2016.

Além disso, o modelo possuía as duas mesas livres para se deslocar lateralmente ao longo de todo o comprimento da viga, com vínculo de garfo nas extremidades e aplicação de momento uniforme.

Para esse modelo, variou-se o tamanho do lado do elemento de malha em função da largura da mesa, b_f . Sendo assim, foram processados no ANSYS, um a um, os modelos com elemento *SHELL181* com tamanho de lado de um quarto ($1/4$) até um vigésimo ($1/20$) da largura da mesa e então comparados os resultados do momento crítico elástico e o tempo gasto no processamento.

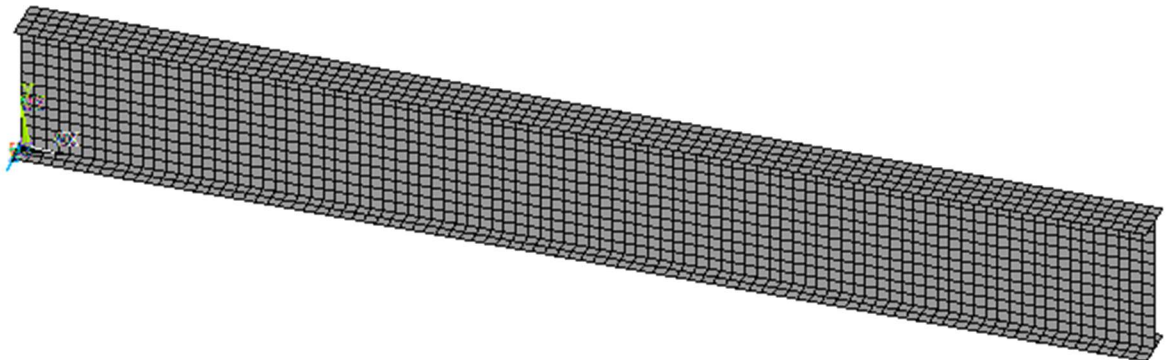
A versão acadêmica do *ANSYS* limita a malha de elementos finitos em 32 mil nós, com isso, as malhas com elementos menores que 2 cm, ou seja, com lado de tamanho a partir de $b_f/12$, não foram processados nessa versão. Sendo assim, os *scripts* com os *inputs* dos modelos de $b_f/12$ a $b_f/20$ foram entregues à orientadora Carla Cristiane Silva, que os executou nos computadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que contém a versão completa do programa.

O modelo com elemento de lado $b_f/8$ gastou 17 segundos para ser processado e apresentou momento crítico de 207,07 kN.m, o que representa uma diferença 0,54% do momento crítico do último caso e um tempo de processamento bastante reduzido.

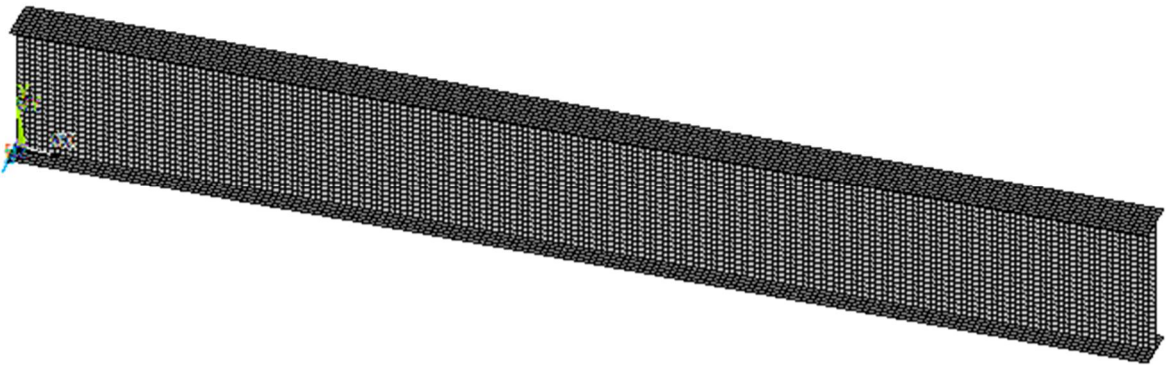
Por fim, diante dos resultados apresentados, optou-se por utilizar uma malha com tamanho do elemento em função da largura das mesas do perfil, igual a $b_f/8$, que apresenta boa performance computacional e garante precisão suficiente para a análise, já que segundo DIAS (2018), quando o desvio do momento crítico elástico com relação ao resultado da malha seguinte é menor que 1%, tem-se um erro numérico negligenciável.

Com o propósito de comparar visualmente as densidades analisadas, a Figura 19 exhibe três modelos com diferentes divisões da malha, sendo a Figura 19-b correspondente à densidade optada.

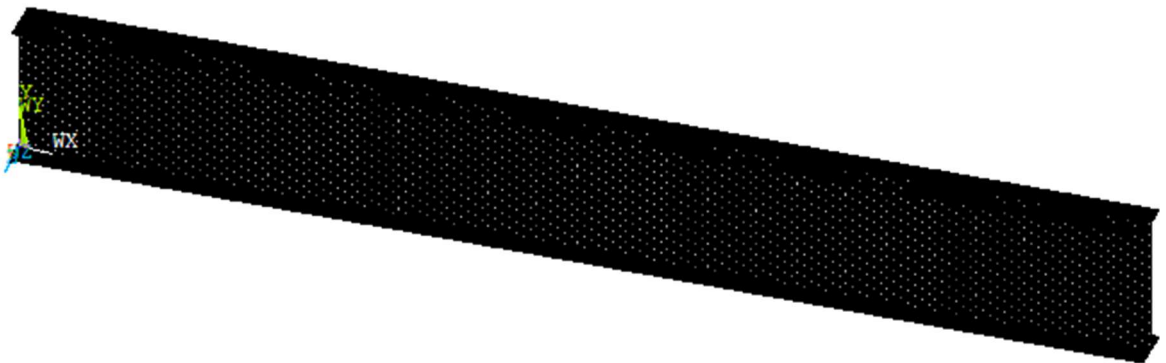
Figura 19 - Diferentes densidades analisadas



(a) Quatro divisões na mesa.



(b) Oito divisões na mesa (malha adotada).



(c) Vinte divisões na mesa.

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

4.5 Validação dos modelos

Para comprovar a confiabilidade dos modelos utilizados neste trabalho, fez-se o processamento no *ANSYS* e o cálculo analítico de problemas semelhantes tratados por outros dois autores, conforme dispostos na Tabela 2. Esses autores, DIAS (2018) e BEZERRA (2011), efetuaram verificações considerando as mesmas condições de contorno aqui adotadas (vínculo de garfo e simulação de momento constante).

Tabela 2 - Validação dos modelos numérico e analítico

BEZERRA (2011)	<i>d</i> (cm)	<i>b_f</i> (cm)	<i>t_f</i> (cm)	<i>t_w</i> (cm)	<i>L_b</i> (cm)	<i>M_{cr,an T}</i> (kN.cm)	<i>M_{cr,an B}</i> (kN.cm)	<i>M_{cr,num B}</i> (kN.cm)	<i>M_{cr,num T}</i> (kN.cm)
Perfil W310x28,3	30,9	10.2	0.89	0.60	500	31,801	31,9	31,28	30,86
Perfil W 510x74	52,9	16.6	1.36	0.97	1000	98,07	98,41	96,84	95,60

DIAS (2018)	<i>d</i> (cm)	<i>b_f</i> (cm)	<i>t_f</i> (cm)	<i>t_w</i> (cm)	<i>L_b</i> (cm)	<i>M_{cr,an T}</i> (kN.cm)	<i>M_{cr,an D}</i> (kN.cm)	<i>M_{cr,num D}</i> (kN.cm)	<i>M_{cr,num T}</i> (kN.cm)
FLT -01	15	10	0,49	0,43	300	18,13	18,55	17,79	17,70
FLT -02	26	10	1	0,64	600	27,38	27,8	26,34	26,49
FLT -03	36	17	0,98	0,69	650	92,08	93,73	89,42	89,62
FLT -04	53	21	1,74	1,09	1000	239,65	243,6	230,43	232,01

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

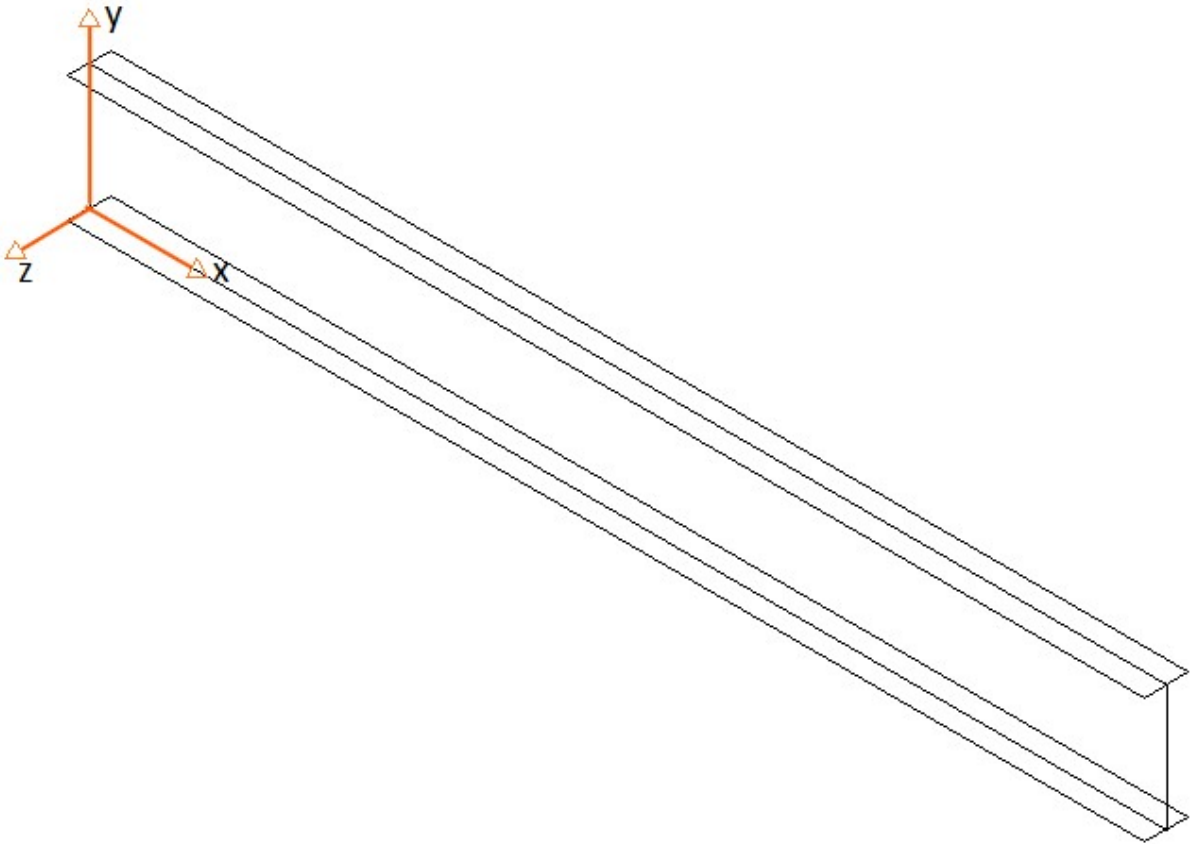
Na primeira coluna estão nomeados os modelos, conforme apresentado pelos autores, ao passo que as cinco colunas seguintes apresentam os parâmetros de entrada de cada problema. Onde se lê “ $M_{cr,an T}$ ” são os valores resultantes da análise a partir da ABNT NBR 8800:2008 pelo presente trabalho, assim como “ $M_{cr,num T}$ ” são os valores resultantes da análise numérica também do presente trabalho. Já “ $M_{cr,an B}$ ” e “ $M_{cr,an D}$ ” são os valores resultantes analíticos dos autores BEZERRA (2011) e DIAS (2018), respectivamente. “ $M_{cr,num B}$ ” são os valores numéricos obtidos por BEZERRA (2011) através do *software* ABAQUS e “ $M_{cr,num D}$ ” os valores numéricos obtido pelo *ANSYS* por DIAS (2018).

Os valores analíticos, apesar de não coincidirem, são validados. Essa pequena divergência observada na comparação dos resultados pode ser justificada devido ao uso ou não de parâmetros geométricos tabelados, que, aqui, foi feito o uso de fórmulas analíticas para encontrar tais parâmetros, não considerando o raio de concordância entre as mesas e a alma. Já os valores obtidos numericamente também se validam, pois apresentam resultados próximos, e a divergência é inferior a 1% em todos os casos (0,68% no último modelo).

4.6 Generalidades do modelo numérico

A geometria do modelo foi definida através de retângulos, cujas superfícies representam o plano que passa pela linha média das mesas e pelo eixo central da alma. As coordenadas utilizadas para a definição da geometria foram tomadas de acordo com o programa, onde a origem está situada na metade da altura da mesa inferior, no centro de sua largura e na extremidade esquerda do comprimento da viga. O eixo x se encontra na direção longitudinal da viga, o eixo y na direção perpendicular aos planos das mesas e o eixo z na direção perpendicular ao comprimento da alma. Esses detalhes podem ser observados na Figura 20.

Figura 20 - Sistema de coordenadas e geometria por retângulos



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O módulo de elasticidade do aço e o coeficiente de Poisson, como já mencionados, foram tomados iguais a 20000 kN/cm^2 e $0,3$, respectivamente, e para todos os casos a resistência ao escoamento do aço foi tomada igual a $34,5 \text{ kN/cm}^2$.

Os modelos estudados, em todos os casos, possuem seção transversal com altura (d) de 60 cm e largura da mesa (b_f) de 20 cm . Eles foram modelados de forma que a esbeltez da alma (λ_w), razão de h_w/t_w , se mantivesse entre 20 e 120 , variando de 20 em 20 . Para isso, foram adotadas diferentes espessuras para a alma (t_w), apresentadas na Tabela 3.

Já para as mesas, adotou-se espessura (t_f) de $1,6 \text{ cm}$, $3,33 \text{ cm}$ e $1,11 \text{ cm}$ respectivamente para esbeltezes da mesa de $6,25$, $3,0$ e $9,0$. Por fim, as vigas foram projetadas com comprimento longitudinal igual ao comprimento destravado (L_b) de forma a assegurar que a razão L/h_o se mantivesse entre 8 e 20 , faixa das situações usuais segundo SILVA (2017), variando-se de 2 em 2 .

Com isso, foram analisados sete comprimentos destravados diferentes, seis parâmetros de esbeltez da alma e ainda três parâmetros de esbeltez da mesa, totalizando em 54 modelos. Estes são dispostos na Tabela 3 que resume suas características geométricas.

Tabela 3 - Modelos utilizados para os cálculos numéricos e analíticos

Nome	l (cm)	d (cm)	h _w (cm)	h _o (cm)	b _r (cm)	t _r (cm)	t _w (cm)	l/h _o	h _w /t _w	b _r /2t _r
FLT01	467,2	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	8,00	20	6,25
FLT02	467,2	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	8,00	40	6,25
FLT03	467,2	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	8,00	60	6,25
FLT04	467,2	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	8,00	80	6,25
FLT05	467,2	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	8,00	100	6,25
FLT06	467,2	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	8,00	120	6,25
FLT07	584	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	10,00	20	6,25
FLT08	584	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	10,00	40	6,25
FLT09	584	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	10,00	60	6,25
FLT10	584	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	10,00	80	6,25
FLT11	584	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	10,00	100	6,25
FLT12	584	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	10,00	120	6,25
FLT13	700,8	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	12,00	20	6,25
FLT14	700,8	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	12,00	40	6,25
FLT15	700,8	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	12,00	60	6,25
FLT16	700,8	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	12,00	80	6,25
FLT17	700,8	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	12,00	100	6,25
FLT18	700,8	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	12,00	120	6,25
FLT19	817,6	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	14,00	20	6,25
FLT20	817,6	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	14,00	40	6,25
FLT21	817,6	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	14,00	60	6,25
FLT22	817,6	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	14,00	80	6,25
FLT23	817,6	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	14,00	100	6,25
FLT24	817,6	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	14,00	120	6,25
FLT25	934,4	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	16,00	20	6,25
FLT26	934,4	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	16,00	40	6,25
FLT27	934,4	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	16,00	60	6,25
FLT28	934,4	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	16,00	80	6,25
FLT29	934,4	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	16,00	100	6,25
FLT30	934,4	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	16,00	120	6,25
FLT31	1051	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	18,00	20	6,25
FLT32	1051	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	18,00	40	6,25
FLT33	1051	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	18,00	60	6,25
FLT34	1051	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	18,00	80	6,25
FLT35	1051	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	18,00	100	6,25
FLT36	1051	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	18,00	120	6,25
FLT37	1168	60	56,8	58,4	20	1,6	2,84	20,00	20	6,25
FLT38	1168	60	56,8	58,4	20	1,6	1,42	20,00	40	6,25
FLT39	1168	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	20,00	60	6,25
FLT40	1168	60	56,8	58,4	20	1,6	0,71	20,00	80	6,25
FLT41	1168	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	20,00	100	6,25
FLT42	1168	60	56,8	58,40	20	1,6	0,473	20,00	120	6,25
FLT43	566,67	60	53,33	56,67	20	3,33	2,667	10,00	20	3
FLT44	566,67	60	53,33	56,67	20	3,33	1,333	10,00	40	3
FLT45	566,67	60	53,33	56,67	20	3,33	0,889	10,00	60	3

FLT46	566,67	60	53,33	56,67	20	3,33	0,667	10,00	80	3
FLT47	566,67	60	53,33	56,67	20	3,33	0,533	10,00	100	3
FLT48	566,67	60	53,33	56,67	20	3,33	0,444	10,00	120	3
FLT49	588,89	60	57,78	58,89	20	1,11	2,889	10,00	20	9
FLT50	588,89	60	57,78	58,89	20	1,11	1,444	10,00	40	9
FLT51	588,89	60	57,78	58,89	20	1,11	0,963	10,00	60	9
FLT52	588,89	60	57,78	58,89	20	1,11	0,722	10,00	80	9
FLT53	588,89	60	57,78	58,89	20	1,11	0,578	10,00	100	9
FLT54	588,89	60	57,78	58,89	20	1,11	0,481	10,00	120	9

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

4.7 Condições de contorno

A forma com que o elemento estrutural está inserido no meio externo é o que se define como condições de contorno, já que caracteriza o que ocorre nas fronteiras do problema, sejam as cargas aplicadas sobre a estrutura ou ainda as restrições de deslocamentos nodais (FILHO, 2011).

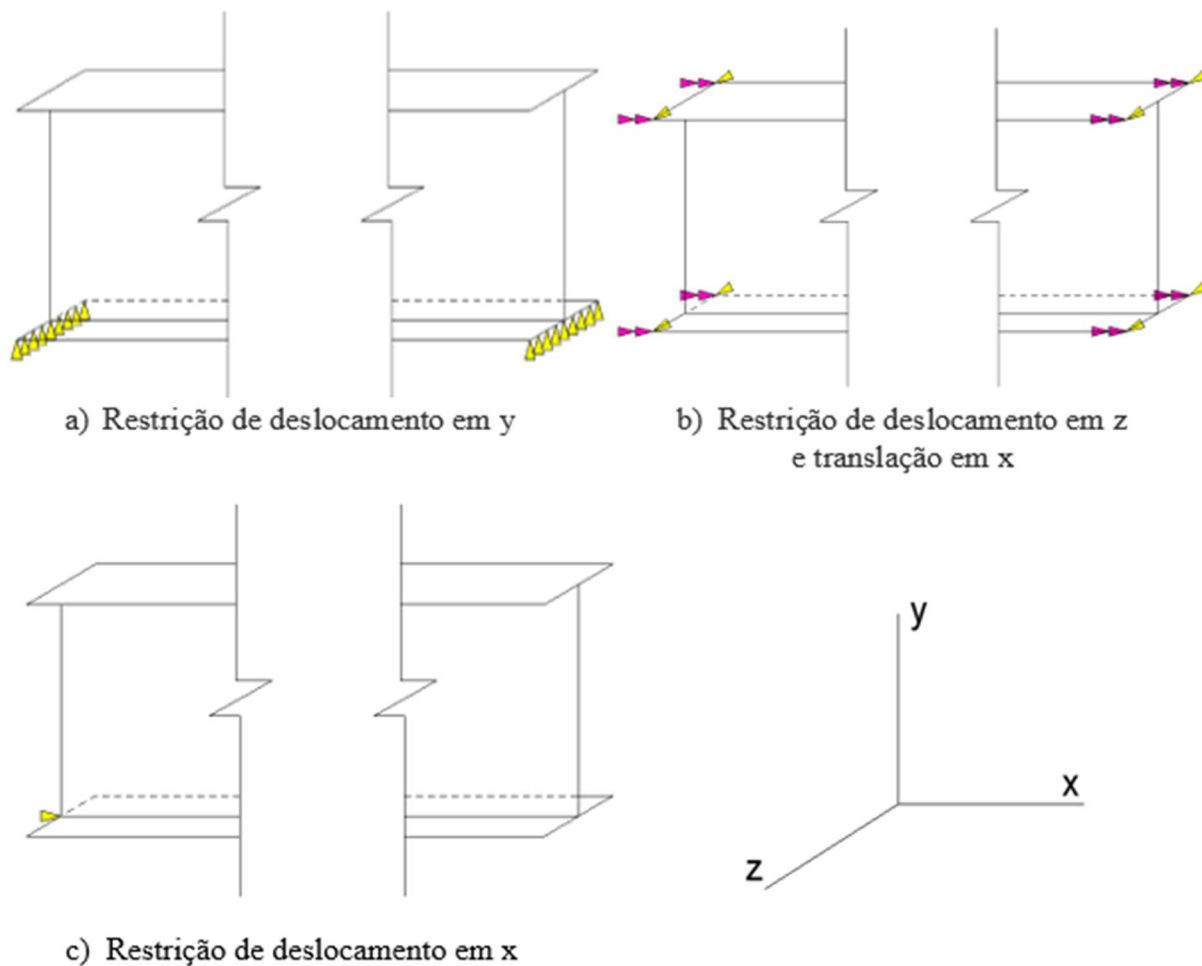
Para simular o vínculo de garfo, segundo BEZERRA (2011), basta que configure empenamento livre e torção impedida. Para isso, nas seções transversais das extremidades (apoios), foi restringido em todos os nós da mesa inferior o deslocamento em y (Figura 21-a). Já nos nós de canto das mesas nas seções de extremidade, foram restringidos o deslocamento em z e a rotação em x (Figura 21-b). Essas restrições, observadas na Figura 21, são demonstradas pelos triângulos duplos na cor rosa, que simbolizam o impedimento de torção, enquanto que os triângulos amarelos simbolizam o impedimento de translação. O deslocamento lateral na direção x foi restringido apenas em um nó, localizado na extremidade esquerda da viga, no centro da seção da mesa inferior (Figura 21-c).

A Figura 22 retrata, em planta, o modo de flambagem de uma viga de seção I com vínculo de garfo nas duas extremidades do comprimento destravado. Já a Figura 23 apresenta as condições de vínculo apontadas anteriormente sobre uma viga submetida a momento constante.

Segundo FARIA, CARVALHO e FAKURY (2018), quando o diagrama de momento fletor apresenta valor constante é quando ocorre a situação mais crítica para vigas sujeitas à FLT. Para simular esse carregamento, aplicou-se um binário de forças nas extremidades da viga, resultando em um momento fletor uniforme de 1 kN.cm com o carregamento na seção transversal das mesas superior e inferior, de modo que na mesa inferior atuou força de tração e na mesa superior de compressão. Essa situação é apresentada esquematicamente na Figura 24. As cargas foram aplicadas dividindo-se o momento atuante

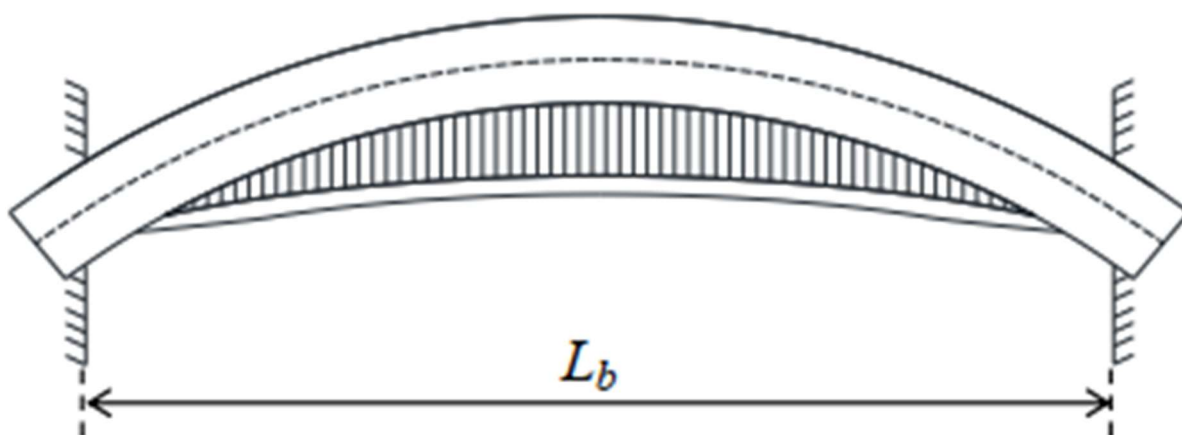
(M_0) unitário (1 kN.cm) pela largura das mesas e pela distância entre as linhas médias das mesmas.

Figura 21 - Restrições de translação e rotação



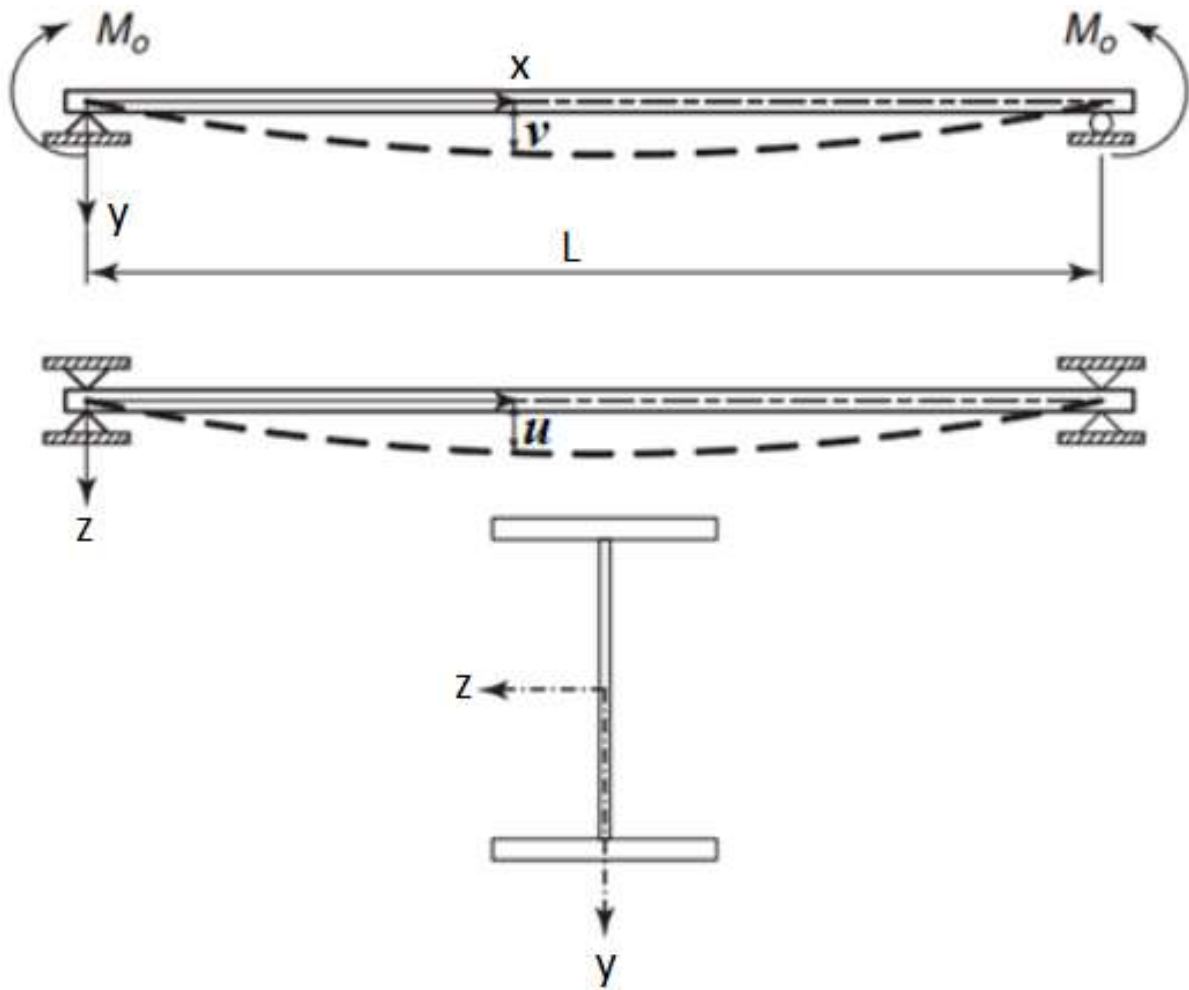
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 22 - Modo de flambagem com vínculo de garfo



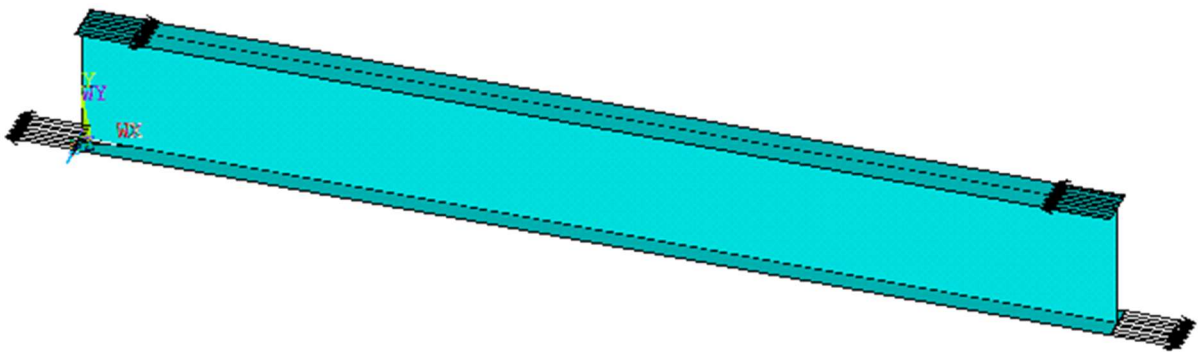
Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

Figura 23 - Caso de momento fletor constante com restrições de vínculo de garfo



Fonte: Adaptado de GALAMBOS e SUROVEK, 2008 (apud ROSSI, 2018).

Figura 24 - Simulação de momento constante ao longo de todo o comprimento destravado



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

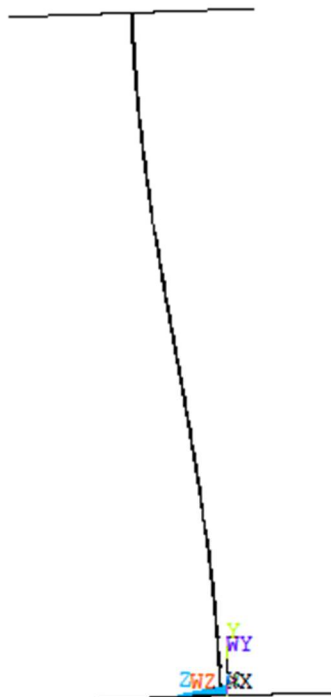
5.1 Considerações Gerais

Aqui serão apresentados os resultados analíticos, que não levam em consideração a distorção da alma, bem como os resultados numéricos que consideram esse efeito.

Os resultados analíticos foram retirados da planilha de cálculo (APÊNDICE B) através do uso do *software* Excel. Nela foram inseridas as formulações normativas e obtidos os valores do momento crítico elástico de cada modelo.

Conforme foi apresentado, a norma ABNT NBR 8800:2008 considera que após a deformação da viga, a alma do perfil permanece rígida. Ao contrário disso, em situações reais, a alma sofre distorção. A Figura 25 mostra a seção central de uma viga metálica em perfil I analisada no presente estudo, após sofrer a FLT. Como pode ser observado, a alma apresenta uma ondulação, o que caracteriza a ocorrência da distorção.

Figura 25 - Distorção da alma



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Será analisada a influência desse efeito no momento crítico da flambagem lateral com torção comparando-se os diferentes comprimentos destravados, bem como a variação da esbeltez da mesa e da esbeltez da alma. Para isso, será verificado em quais casos a consideração da distorção pode gerar grandes divergências em relação aos resultados da ABNT NBR 8800:2008.

5.2 Influência do comprimento destravado e da esbeltez da alma

Os valores dos momentos críticos elásticos dos modelos numéricos, que levam em conta o efeito de distorção da alma, foram comparados com os valores de momento crítico elástico analíticos, calculados segundo a ABNT NBR 8800:2008, considerando os diferentes parâmetros de esbeltez da alma para cada comprimento destravado proposto.

Na Tabela 4 encontra-se, na 9ª coluna, os resultados das análises numéricas dos modelos FLT01 à FLT42 sob as condições de carregamento e restrições descritas anteriormente. Esses resultados possibilitam a comparação da variação do momento crítico elástico em função da esbeltez da alma para os diferentes comprimentos destravados e são confrontados, um a um, com os resultados analíticos obtidos pelas instruções normativas da ABNT NBR 8800:2008, que se encontram na 8ª coluna.

Por fim, na última coluna são apresentadas as divergências e convergências dos dois métodos de análise, através da razão entre os resultados analíticos e os resultados numéricos.

Tabela 4 - Resultados analíticos e numéricos para os modelos FLT01 à FLT42

Nome	l (cm)	t_f (cm)	t_w (cm)	l/h_o	h_w/t_w	$b_f/2t_f$	$M_{cr,an}$ (kN.cm)	$M_{cr,num}$ (kN.cm)	$\frac{M_{cr,an}}{M_{cr,num}}$
FLT01	467,2	1,6	2,84	8	20	6,25	105475,05	102565,0	1,03
FLT02	467,2	1,6	1,42	8	40	6,25	69573,01	67325,0	1,03
FLT03	467,2	1,6	0,947	8	60	6,25	65094,62	62447,2	1,04
FLT04	467,2	1,6	0,71	8	80	6,25	63960,60	60771,9	1,05
FLT05	467,2	1,6	0,568	8	100	6,25	63553,21	59712,9	1,06
FLT06	467,2	1,6	0,473	8	120	6,25	63371,88	58814,3	1,08
FLT07	584	1,6	2,84	10	20	6,25	79452,00	77630,9	1,02
FLT08	584	1,6	1,42	10	40	6,25	48552,82	47169,7	1,03
FLT09	584	1,6	0,947	10	60	6,25	44474,24	42816,1	1,04
FLT10	584	1,6	0,71	10	80	6,25	43426,83	41414,8	1,05
FLT11	584	1,6	0,568	10	100	6,25	43048,92	40597,4	1,06
FLT12	584	1,6	0,473	10	120	6,25	42880,43	39910,9	1,07
FLT13	700,8	1,6	2,84	12	20	6,25	63868,62	62596,8	1,02
FLT14	700,8	1,6	1,42	12	40	6,25	36847,46	35893,1	1,03
FLT15	700,8	1,6	0,947	12	60	6,25	33116,85	31954,2	1,04
FLT16	700,8	1,6	0,71	12	80	6,25	32146,41	30732,9	1,05
FLT17	700,8	1,6	0,568	12	100	6,25	31794,83	30069,1	1,06
FLT18	700,8	1,6	0,473	12	120	6,25	31637,81	29530,4	1,07
FLT19	817,6	1,6	2,84	14	20	6,25	53498,06	52543,3	1,02
FLT20	817,6	1,6	1,42	14	40	6,25	29559,72	28851,1	1,02

FLT21	817,6	1,6	0,947	14	60	6,25	26136,40	25261,7	1,03
FLT22	817,6	1,6	0,71	14	80	6,25	25235,82	24173,6	1,04
FLT23	817,6	1,6	0,568	14	100	6,25	24908,34	23616,1	1,05
FLT24	817,6	1,6	0,473	14	120	6,25	24761,86	23183	1,07
FLT25	934,4	1,6	2,84	16	20	6,25	46089,11	45335,2	1,02
FLT26	934,4	1,6	1,42	16	40	6,25	24647,42	24094	1,02
FLT27	934,4	1,6	0,947	16	60	6,25	21495,62	20805,4	1,03
FLT28	934,4	1,6	0,71	16	80	6,25	20658,48	19822,7	1,04
FLT29	934,4	1,6	0,568	16	100	6,25	20353,07	19342,5	1,05
FLT30	934,4	1,6	0,473	16	120	6,25	20216,28	18986,6	1,06
FLT31	1051,2	1,6	2,84	18	20	6,25	40522,42	39904,5	1,02
FLT32	1051,2	1,6	1,42	18	40	6,25	21134,96	20686,4	1,02
FLT33	1051,2	1,6	0,947	18	60	6,25	18222,82	17658,8	1,03
FLT34	1051,2	1,6	0,71	18	80	6,25	17443,06	16762,7	1,04
FLT35	1051,2	1,6	0,568	18	100	6,25	17157,78	16341,4	1,05
FLT36	1051,2	1,6	0,473	18	120	6,25	17029,85	16042,8	1,06
FLT37	1168	1,6	2,84	20	20	6,25	36180,54	35659,5	1,01
FLT38	1168	1,6	1,42	20	40	6,25	18507,21	18133,2	1,02
FLT39	1168	1,6	0,947	20	60	6,25	15806,63	15333,5	1,03
FLT40	1168	1,6	0,71	20	80	6,25	15078,60	14510,3	1,04
FLT41	1168	1,6	0,568	20	100	6,25	14811,60	14135	1,05
FLT42	1168	1,6	0,473	20	120	6,25	14691,75	13880,1	1,06

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

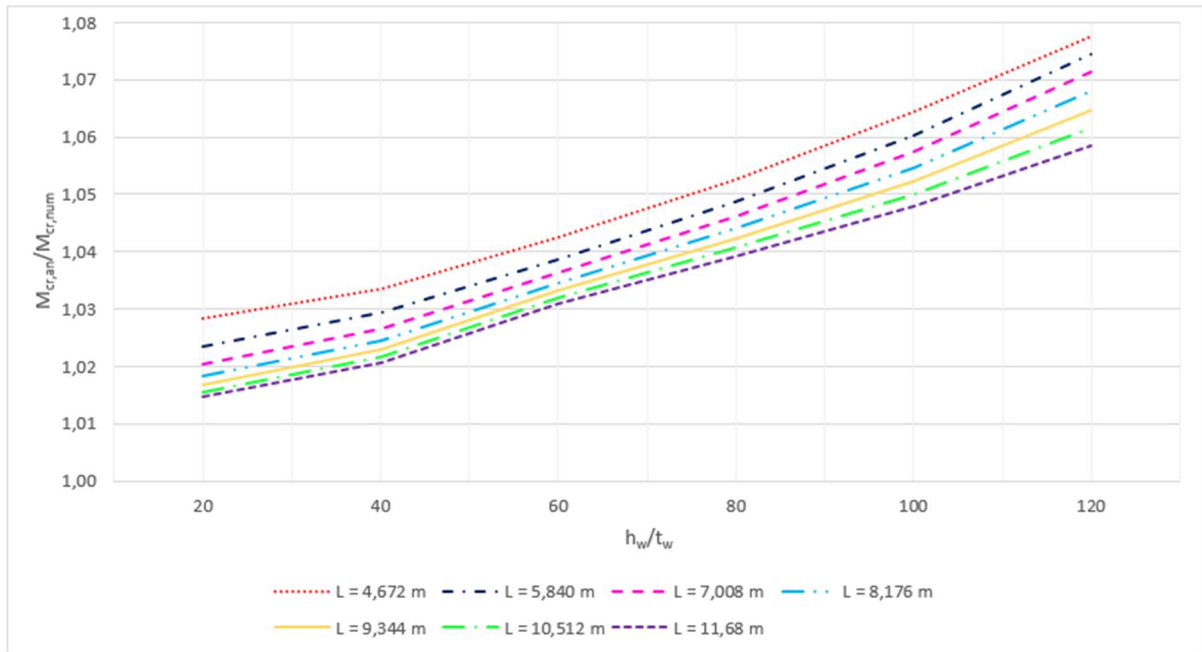
Para essa comparação, foi traçado o Gráfico 2, da razão entre os dois resultados para os vários comprimentos destravados da viga, em função do parâmetro de esbeltez da alma, h_w/t_w .

Para todos os comprimentos destravados, desde a razão l/h_o de 8 até 20, as curvas apresentam a mesma tendência de comportamento, a diferença entre os resultados analíticos e numéricos tende a aumentar à medida que se eleva a esbeltez da alma. Apesar disso, os menores comprimentos destravados foram responsáveis pelas maiores diferenças entre os dois resultados, o que indica que para pequenos comprimentos destravados a influência da distorção da alma é maior e também aponta para o fato de que a norma apresenta valores superestimados de momento crítico para esses casos, fato contrário a segurança, já que propõe ser necessário um momento maior do que o real para atingir o estado-limite último da FLT.

Segundo SILVA (2017), em projetos usuais, a razão l/d (vão da viga sobre a sua altura) é superior a 15. Entre os comprimentos destravados analisados, somente o de 934,4 cm e os superiores a esse valor apresentam razão l/d maior que 15. Sendo assim, a distorção da

alma apresenta maior influência nos casos usuais somente quando se trata de perfis soldados, que, ainda segundo a autora, podem ter o parâmetro de esbeltez da alma ultrapassando o valor limite de 120 adotado no presente trabalho, enquanto que os perfis laminados fabricados pela Gerdau têm a esbeltez da alma variando entre 17,42 e 55,78.

Gráfico 2 - Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma, h_w/t_w , para os vários comprimentos destravados, L_b



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

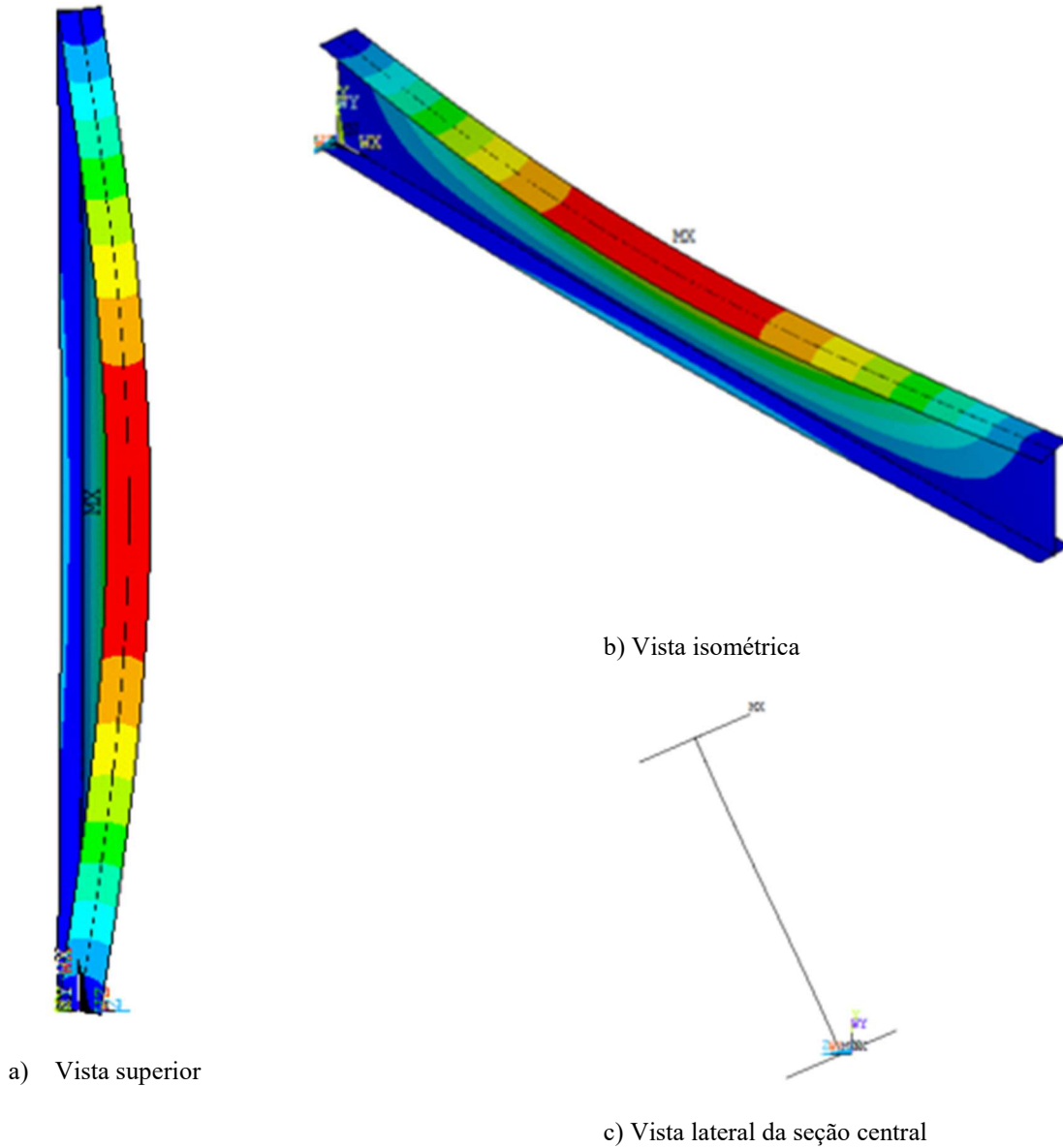
Como já observado, quanto maior o parâmetro de esbeltez da alma, maior é a diferença entre os momentos críticos elástico analítico e numérico. Isso implica que para vigas esbeltas, não consideradas no presente trabalho, a influência da distorção da alma nos resultados tende a ser ainda maior. Sendo assim, quanto maior o parâmetro de esbeltez da alma, mais superestimado é o momento crítico seguindo as instruções de cálculo da ABNT NBR 8800:2008, que conforme já mencionado é um fato contrário a segurança.

A Figura 26 traz ilustrações dos resultados apresentados pelo *software ANSYS* para o caso de comprimento destravado igual a 467,2 cm, esbeltez da alma de 60 e diferença entre os resultados analítico e numérico de aproximadamente 4%. Pode-se perceber na Figura 26-c, que a distorção na alma na seção central da viga é pequena e chega a ser quase que imperceptível visualmente.

Esses resultados, quando comparados com o estudo feito por SILVA (2017), mostram-se confiáveis, já que apresentaram valores muito próximos. As curvas da razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma apresentaram comportamento semelhante em

ambas as pesquisas, com valores baixos para pequenos parâmetros de esbeltez da alma, enquanto que as curvas de menor comprimento apresentam valores mais significativos à medida que se eleva a esbeltez da alma.

Figura 26 - Ilustração da flambagem lateral com torção do modelo FLT03



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Em SILVA (2017), os modelos com as mesmas características de carga e restrição dos analisados aqui, para os comprimentos destravados de 6 m, 8 m e 10 m, as razões entre os momentos críticos analíticos e numéricos atingiram o valor máximo de 7,9%, 7,0% e 6,0%, respectivamente. Enquanto que no presente trabalho, a razão entre os momentos para os vãos de 5,84 m, 8,176 m e 10,512 m, foram, respectivamente 7,4%, 7,0% e 6,0%.

Com isso, confirma-se o aumento da influência da distorção da alma no momento resistente à flambagem lateral com torção a medida que se reduz o comprimento destravado e se eleva a esbeltez da alma.

5.3 Influência da esbeltez da mesa

A Tabela 5 apresenta os resultados, para os modelos FLT07 à FLT12 e FLT43 à FLT54, dos momentos críticos elásticos analítico e numérico, bem como a razão entre eles e os dados de entrada. Nesses modelos foi analisada a influência do parâmetro de esbeltez da mesa nessa razão, apenas para as situações em que a razão entre o comprimento destravado e a distância entre as linhas médias das mesas (l/h_o) possui o valor 10.

Os valores de esbeltez da mesa de 3, 6,25 e 9 foram adotados porque, segundo SILVA (2017), esse intervalo permite variar de um valor grande a um valor pequeno, além de manter-se dentro da faixa em que não ocorre flambagem local, efeito não analisado no presente estudo.

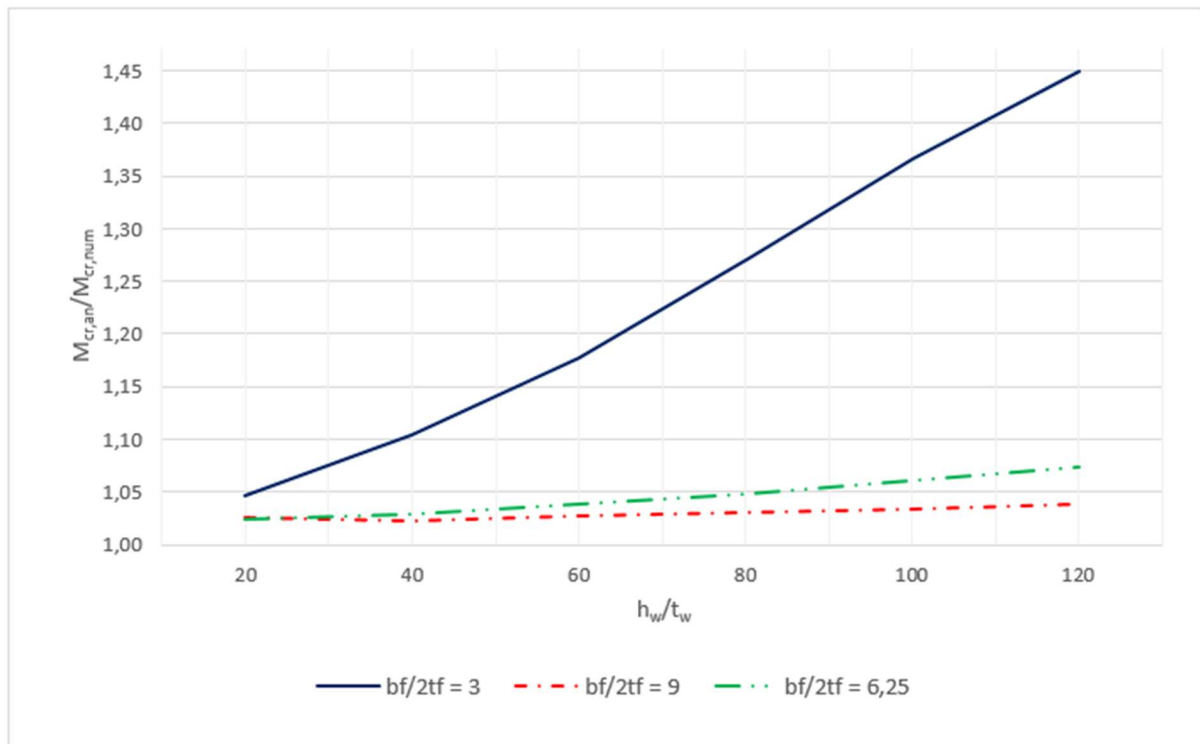
Tabela 5 - Resultados analíticos e numéricos para os modelos FLT07 à FLT12 e FLT43 à FLT54

Nome	l (cm)	tf (cm)	tw (cm)	l/h _o	hw/tw	bf/2tf	M _{cr,an} (kN.cm)	M _{cr,num} (kN.cm)	$\frac{M_{cr,an}}{M_{cr,num}}$
FLT07	584	1,6	2,84	10	20	6,25	79452,00	77630,9	1,02
FLT08	584	1,6	1,42	10	40	6,25	48552,82	47169,7	1,03
FLT09	584	1,6	0,947	10	60	6,25	44474,24	42816,1	1,04
FLT10	584	1,6	0,71	10	80	6,25	43426,83	41414,8	1,05
FLT11	584	1,6	0,568	10	100	6,25	43048,92	40597,4	1,06
FLT12	584	1,6	0,473	10	120	6,25	42880,43	39910,9	1,07
FLT43	566,67	3,33	2,667	10	20	3	154830,60	147921,0	1,05
FLT44	566,67	3,33	1,333	10	40	3	131397,35	119054,0	1,10
FLT45	566,67	3,33	0,889	10	60	3	128855,50	109484,0	1,18
FLT46	566,67	3,33	0,667	10	80	3	128229,89	100933,0	1,27
FLT47	566,67	3,33	0,533	10	100	3	128005,26	93697,7	1,37
FLT48	566,67	3,33	0,444	10	120	3	127906,39	88284,7	1,45
FLT49	588,89	1,11	2,889	10	20	9	63995,02	62367,3	1,03
FLT50	588,89	1,11	1,444	10	40	9	33564,31	32821,3	1,02
FLT51	588,89	1,11	0,963	10	60	9	29143,19	28385,3	1,03
FLT52	588,89	1,11	0,722	10	80	9	27968,75	27141,0	1,03
FLT53	588,89	1,11	0,578	10	100	9	27541,12	26625,6	1,03
FLT54	588,89	1,11	0,481	10	120	9	27348,21	26328,9	1,04

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Para comparar os valores encontrados nos modelos analíticos e aqueles encontrados nos modelos numéricos, foi traçado o Gráfico 3. Nele são apresentadas três linhas, uma para cada valor de esbeltez das mesas ($b_f/2t_f$), em função da razão entre os momentos críticos elásticos analítico e numérico e da esbeltez da alma.

Gráfico 3 - Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma, h_w/t_w , para cada valor de esbeltez da mesa, $b_f/2t_f$



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Os resultados apresentados no Gráfico 3 mostram que para grandes parâmetros de esbeltez da mesa, como para o valor de 9, a consideração da distorção da alma não apresenta grande influência no momento crítico elástico, visto que a diferença entre os resultados analítico e numérico ficam abaixo de 5%. Isso também acontece para a esbeltez da mesa de 6,25, cuja maior influência da distorção foi cerca de 7%. Em contrapartida, a medida que se eleva o parâmetro de esbeltez da alma para valores baixos de esbeltez da mesa, no caso estudado de 3,0, a influência da consideração desse efeito pode chegar a 45%, o que indica diferença considerável entre os valores obtidos pela ABNT NBR 8800:2008 e pelo Método dos Elementos Finitos.

Para o valor de 60, máximo de esbeltez da alma de perfis laminados fabricados pela Gerdau, a diferença entre os valores analíticos e numéricos foi de 3% para esbeltez da mesa de 9, e de 4% para esbeltez da mesa de 6,25, enquanto que para a menor esbeltez analisada, no valor de 3, a diferença foi de 18% entre os momentos críticos elásticos.

Como pôde ser observado, para casos em que o comprimento destravado é menor, a influência da distorção da alma no momento crítico elástico é maior. Posto isso, se analisada a variação da esbeltez das mesas para vãos menores que o de razão l/h_o igual a 10, é grande a probabilidade de a razão entre os resultados analítico e numérico serem ainda maiores.

Os valores expressivos para a razão entre os momentos críticos elásticos analítico e numérico de vigas com mesas mais espessas se justificam devido às rigidezes à torção e ao deslocamento lateral, nesses casos, serem maiores quando se considera o corpo rígido, situação adotada pela norma brasileira de projeto de estruturas de aço (SILVA, 2017).

Por fim, através dos resultados aqui expostos, pode-se observar que a distorção da alma causa uma redução no momento crítico elástico, notadamente em vigas com parâmetros de esbeltez da alma elevado (considerando o limite proposto no trabalho), com comprimento de flambagem reduzido e baixo parâmetro de esbeltez da mesa. Nota-se então, a necessidade de adequar as formulações de momento crítico elástico propostas pela ABNT NBR 8800:2008 com relação a consideração do efeito distorcional mencionado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Inicialmente, neste trabalho, desenvolveu-se um estudo a respeito da flambagem lateral com torção e das principais características que envolvem esse estado-limite último, criando uma base para amparar as investigações propostas e a análise crítica dos resultados. Ainda foram abordados conceitos relacionados ao *software ANSYS*, principalmente no que tange a linguagem de programação *APDL* e o Método dos Elementos Finitos.

Posteriormente foram explanados os procedimentos de cálculo do momento crítico elástico, segundo a ABNT NBR 8800:2008, responsável por provocar a FLT em vigas de aço com seção I duplamente simétricas com vínculo de garfo e sob a ação de momento fletor constante ao longo do seu comprimento.

Por fim, foram apresentados e discutidos os resultados dos diferentes métodos e para as diferentes comparações.

Os diferentes vãos (iguais ao comprimento destravado) e seções estudadas foram modeladas considerando modelos simplificados com um vão biapoiado e vínculo de garfo, o que permitiu avaliar a precisão dos resultados normativos quanto ao estado-limite último de FLT, já que essa não considera o efeito de distorção na alma para esse modo de instabilidade.

A comparação entre os dois métodos de cálculo estudados permitiu mensurar a influência do efeito da distorção nos resultados numéricos.

Verifica-se que, como a razão entre os momentos críticos elásticos obtidos por modelos analíticos e por análises numéricas é maior em casos onde as mesas tem maior espessura, o parâmetro de esbeltez da mesa também tem influência na distorção da alma, assim como o comprimento destravado e o parâmetro de esbeltez da alma.

Considerando os objetivos propostos inicialmente para este estudo, de comparar os resultados analíticos obtidos pela ABNT NBR 8800:2008 com os resultados numéricos obtidos através do Método dos Elementos Finitos pelo *ANSYS*, concluiu-se que a formulação proposta pela norma, dentro das condições apresentadas aqui, pode conduzir a resultados superestimados e, eventualmente, contrários à segurança, principalmente à medida que se eleva a esbeltez da alma e se reduz o comprimento destravado e a esbeltez das mesas.

Por fim, como foi apresentado ao longo do trabalho, a determinação do momento crítico elástico tem grande importância na determinação do momento fletor resistente para o estado-limite último de flambagem lateral com torção. Entretanto, a norma brasileira de projeto de estruturas de aço apresenta diversas lacunas para essa verificação, como a determinação do

momento crítico para outros tipos de apoio diferentes do vínculo de garfo, bem como não há especificações de cálculo para os casos onde as cargas não são aplicadas na semialtura da seção transversal.

Os coeficientes de segurança das normas de projeto estrutural são aplicados a fim de garantir as incertezas de uma análise estrutural (CASTRO, 1997). Entretanto, mesmo com a aplicação dos coeficientes de segurança propostos, pode ocorrer divergências entre situações reais e os resultados de cálculos, como demonstrado nesta pesquisa. Deve-se então buscar melhorar ou propor novos parâmetros de cálculo que abordem os efeitos que causam divergências significativas dos resultados, a fim de garantir a segurança das edificações.

6.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Aqui serão apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos. Sendo assim, sugere-se:

- Realizar estudo semelhante a esse, para diferentes tipos de carregamento, bem como para a condição de vigas apoiadas com vínculo rígido. Ainda se propõe a elaboração de um fator de correção para os cálculos apresentados pela norma ABNT NBR 8800:2008, a fim de garantir que em seus procedimentos de cálculo seja considerado o efeito de distorção da alma;
- Verificar a validade da adequação à norma brasileira proposta por ROSSI (2018), comparando-se a sua aplicação, em um conjunto significativo de modelos, com análises numéricas;
- Elaborar procedimentos de cálculo para as condições de carregamento e vínculos não abordados na norma brasileira;
- Estudar as variações dos momentos críticos considerando a distorção da alma em perfis com diferentes seções transversais previstas pela ABNT NBR 8800:2008;
- Estudar a influência da distorção da alma em vigas de alma esbeltas, abordadas no Anexo H da norma de projetos de estruturas metálicas;
- Elaborar materiais instrucionais a respeito do *ANSYS* abrangendo modelagens mais complexas para os vários tipos de análise estrutural.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. F. A. C. D. **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção Metálica) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, 2016.
- ABREU, L. M. P. D. **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2011.
- AHNLÉN, M.; WESTLUND, J. **Lateral Torsion Buckling of I-beams: A parametric study of elastic critical moments in structural design software**. Dissertação (Mestrado Engenharia Estrutural) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Chalmers University of Technology: Göteborg, 2013.
- ALMEIDA, W. R. **Utilização de sistemas estruturais metálicos no atual cenário da construção civil brasileira: estudo de caso para a montagem de estrutura e cobertura de galpão industrial de médio porte**. Monografia (Especialista em Gerenciamento de Obras) - Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba, 2017.
- ANSYS, INC. **Release 2020 R2**. [S.l.]: [s.n.], 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2008: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. ABNT. 2008.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo**. 6ª. ed. São Paulo: Pini, 2010.
- BEZERRA, E. M. **Determinação do momento fletor resistente à Flambagem Lateral com Torção de vigas de aço casteladas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2011.
- CASTRO, E. C. D. Procedimento para análise numérica com software ANSYS de uma viga em flexão com a forma T. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 1, p. 43-49, Jan-Jun 2018. ISSN 2179-0612.
- CASTRO, L. A. D. **Análise da segurança no projeto de estruturas: método dos estados limites**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: São Carlos, 1997.
- CHAPRA, C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.
- CUNHA, J. **Curso básico do programa de elementos finitos ANSYS**. 2012. Uberlândia. Notas de aula do minicurso. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

DIAS, J. V. F. **Determinação do momento crítico elástico à flambagem lateral com distorção de vigas mistas contínuas e semicontínuas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2018.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. D. C. E.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. 1ª. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

FARIA, C. C. D.; CARVALHO, H.; FAKURY, R. H. Flambagem lateral com torção em vigas alveolares. In: Simpósio de Mecânica Computacional. XIII. 2018. Vitória. **Anais [.]**, Vitória: Associação Brasileira de Métodos Computacionais e Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

FERREIRA, F. P. V. et al. Análise numérica de vigas celulares considerando as imperfeições físicas com a variação das imperfeições geométricas. In: Encontro Internacional de Produção Científica. IX. 2015. **Anais Eletrônicos [.]**, UniCesumar, 2015. p. 4-8.

FILHO, E. L. V. C. **Ansys - Conceitos básicos**. 2011. Ilha Solteira. Minicurso ANSYS. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2011.

FREITAS, D. R. F.; COELHO, M. F. O. A importância do aço na construção civil. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 07, n. 09, p. 05-10, Setembro 2018. ISSN:2448-0959.

LILLEY, J. et al. ANSYS Tutorial. **University of Alberta**. 2001. Disponível em: <https://sites.ualberta.ca/~wmoussa/AnsysTutorial/index.html>. Acesso em: 21 Fevereiro 2021.

LIMA, L. G. D. B. D. S. APDL: Linguagem fundamental na modelagem em Ansys. **Blog ESSS**. Maio 2009. Disponível em: www.esss.com.br. Acesso em: 20 Janeiro 2021.

MARGARIDO, A. F. **Propriedades dos aços e sua classificação**. [S.l.]: Cursos CBCA.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

NAKAHARA, F. S. **Análise da viabilidade estrutural e econômica entre estruturas de concreto armado e estruturas metálicas**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista: Guaratinguetá, 2017.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço: Dimensionamento prático**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009.

PINHEIRO, A. C. D. F. B. **Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

PRAVIA, Z. M. C.; FICANHA, R. A.; FABEANE, R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço: Edifício Industrial Detalhado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

REIS, A. L. F. D. **O método da energia aplicado à flambagem lateral com torção de vigas de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 1996.

REIS, A.; CAMOTIM, D. **Estabilidade estrutural**. Lisboa: McGRAW-HILL, 2001.

ROSSI, A. **Flambagem lateral com torção e distorção da alma em vigas de perfis I metálicos duplamente simétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) - Universidade Estadual de Maringá: Maringá, 2018.

SAITO, D. H.; ROSSI, A.; MARTINS, C. H. Análise numérica do momento crítico elástico à FLT de vigas I duplamente simétricas. In: Encontro Internacional de Produção Científica. XI. 2019. **Anais Eletrônicos** [..], Unicesumar, 2019.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. **Stell Structures**. 5ª. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2009.

SILVA, A. R. D. D. **Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil área de Construção Metálica) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, 2009.

SILVA, C. C. **Estudo da influência da distorção da alma no momento crítico elástico de flambagem lateral com torção de vigas de aço de alma não esbelta com seção I**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2017.

SILVA, C. C. **Estudo da influência da distorção da alma no momento crítico elástico de flambagem lateral com torção de vigas de aço de alma não esbelta com seção I**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2017. 115 p.

THOMPSON, M. K.; THOMPSON, J. M. **ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis**. Cambridge: Elsevier, 2017.

VELLASCO, P. C. G. D. S. et al. **Modelagem de estruturas de aço e mistas**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

APÊNDICE A – *Script* para processamento dos modelos numéricos

```

! *****!
! FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO
! VIGA METÁLICA EM PERFIL I COM VÍNCULO DE GARFO
! PROGRAMADORES: CARLA CRISTIANE SILVA E MARINA MOLINAR GONZALES
! UNIDADES: kN, cm
! ÚLTIMA REVISÃO: 17/02/2021 - concluído
! *****!
!
! Algumas observações:
!
! - O simbolo '!' indica comentário e não é lido pelo ANSYS
! - A linguagem não diferencia maiúsculo de minúsculo
!
! -----!
! ** _ 1. INICIALIZAÇÃO DO ANSYS _ **!
! -----!
!
/CLEAR,START
/UIS,MSGPOP,4
/NERR,0,,,0
/BATCH
IMMED,0
! -----!
! ** _ 2. PARÂMETROS DE ENTRADA _ **!
! -----!
!
! Parâmetros geométricos
LViga = 467.2           ! [cm] Comprimento da viga
ho = 58.40             ! [cm] Distância entre as linhas médias das mesas
bfz = 20.0             ! [cm] Largura da Mesa
tfy= 1.60              ! [cm] Espessura da Mesa
twz = 0.947           ! [cm] Espessura da Alma

```

```

!
! Parâmetros referentes aos materiais
Ea = 20000          ! [kN/cm2] Módulo de elasticidade do aço
nu = 0.3           ! [adm] Coeficiente de Poisson
!
! Parâmetros referentes a condição de contorno
P = 1              ! [kN.cm] Momento atuante
!
! -----!
! ** _ 3. PRÉ-PROCESSAMENTO _ **!
! -----!
!
! Construção do modelo antes de fazer a solução
!
/PREP7              ! Modo de processamento
!
MODNAME = 'FLT01'
!
Lmodelo = LViga
!
! 3.4 Cria as áreas do modelo geométrico sólido
!
RECTNG,0,LViga,0,ho
wpoffs,0,ho,0
wprota,0,90,0
RECTNG,0,LViga,-bfz/2,bfz/2
wpoffs,0,0,ho
RECTNG,0,LViga,-bfz/2,bfz/2
/REPLOT
!
! 3.1 Adiciona um material da biblioteca
!
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,20000

```

```

MPDATA,PRXY,1,,0.3
!
! 3.2 Adiciona um elemento da biblioteca
!
ET,1,181
!
! 3.3 Adiciona seções da biblioteca
!
SECTYPE,1,SHELL,,mesas      !Seção da mesa
SECDATA,tfy,1,,5
!
SECTYPE,2,SHELL,,alma      !Seção da alma
SECDATA,twz,1,,5
!
! 3.7 Define atributos da malha nos elementos geométricos
!
!Atributos das mesas
!
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,A,LOC,Y,ho
AATT,1,,1,,1
!
!Atributos da alma
!
ASEL,S,LOC,Y,0,ho
ASEL,U,SECN,,1
AATT,1,,1,,2
!
! Define o tamanho da malha
!
ALLSEL,ALL
LESIZE,ALL,bfz/8
!

```

! 3.8 Cria a malha e mescla itens coincidentes

!

WPCSYS,-1,0

ALLSEL,ALL

AMESH,ALL

ALLSEL

NUMMRG,ALL

NUMMRG,ALL

NUMMRG,ALL

!

! 3.9 Aplicação das cargas no modelo MEF

!

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,X,0

NSEL,R,LOC,Y,0

*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT

FMNODE = P/ho/NODECOUNT

F,ALL,FX,-FMNODE

!

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,X,0

NSEL,R,LOC,Y,ho

*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT

FNNODE = P/ho/NODECOUNT

F,ALL,FX,FNNODE

!

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,X,LViga,LViga+0.0001

NSEL,R,LOC,Y,0

*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT

FMNODE = P/ho/NODECOUNT

F,ALL,FX,FMNODE

!

ALLSEL,ALL

```

NSEL,S,LOC,X,LModelo,Lmodelo+0.0001
NSEL,R,LOC,Y,ho
*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT
FNNODE = P/ho/NODECOUNT
F,ALL,FX,-FMNODE
!
! 3.10 Aplicação das restrições no modelo MEF
!
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,LViga,LViga+0.0001
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UY,0
!
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,LViga,LViga+0.001
CM,AUX1,NODE
NSEL,S,LOC,Z,bfz/2
NSEL,A,LOC,Z,-bfz/2
CMSEL,R,AUX1
CM,AUX1,NODE
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,ho
CMSEL,R,AUX1
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
!
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,UX,0
ALLSEL

```

```

!
! -----!
! ** _ 3. PROCESSAMENTO _ **!
! -----!
!
/SOLU                ! Modo de processamento
ANTYPE,0
PSTRES,ON
SOLVE
!
! -----!
! ** _ 4. PÓS PROCESSAMENTO _ **!
! -----!
!
/POST1                ! Modo de pós processamento
SET,LAST
!
! -----!
! ** _ 5. PROCESSAMENTO _ **!
! -----!
!
/SOLU                ! Modo de processamento
ANTYPE,BUCKLE
BUCOPT,LANB,5,,RANGE
SOLVE
!
! -----!
! ** _ 6. PÓS PROCESSAMENTO _ **!
! -----!
!
/POST1                ! Modo de pós processamento
SET,FIRST
PLNSOL,U,SUM

```

APÊNDICE B – Planilha para cálculo dos modelos analíticos

DADOS DE ENTRADA	
γ_{a1}	1,1
E (kN/cm ²)	20000
f_y (kN/cm ²)	34,5
L_b (cm)	588,8889
d (cm)	60
t_f (cm)	1,1111
b_f (cm)	20
t_w (cm)	2,88889

PARÂMETROS DE CÁLCULO	
h_o (cm)	58,8889
h_w (cm)	57,7778
A_g (cm ²)	211,3577086
I_x (cm ⁴)	84970,08
I_y (cm ⁴)	1597,55
r_x (cm)	20,05
r_y (cm)	2,75
W_x (cm ³)	2832,34
J (cm ⁴)	482,63
Z_x (cm ³)	3719,61
β_1 (cm)	0,007
C_w (cm ⁶)	1385038
C_b	1

ESBELTEZ DA ALMA	
λ_w	20,00
ESBELTEZ DA MESA	
λ_f	9,00

ESBELTEZ DA VIGA	
λ	214,20
λ_p	42,376
λ_r	202,74
RESULTADOS	
Mcr (kN.cm)	63995,02
Mpl (kN.cm)	128326,4
Mr (kN.cm)	68400,92