

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

Diego Moreira Machado

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO
SOFTWARE ANSYS MECHANICAL E A NBR 8800:2008 PARA A FLAMBAGEM
LATERAL COM TORÇÃO DE VIGAS METÁLICAS SUBMETIDAS A CARGA
UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA**

Piumhi - MG

2021

Diego Moreira Machado

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO
SOFTWARE ANSYS MECHANICAL E A NBR 8800:2008 PARA A FLAMBAGEM
LATERAL COM TORÇÃO DE VIGAS METÁLICAS SUBMETIDAS A CARGA
UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA**

Trabalho de conclusão de curso 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: Prof. Me. Carla Cristiane Silva

Piumhi - MG

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

M149e Machado, Diego Moreira.

Estudo comparativo entre resultados obtidos pelo software Ansys Mechanical e a NBR 8800:2008 para flambagem lateral com torção de vigas metálicas submetidas a carga uniformemente distribuída [manuscrito] / Diego Moreira Machado. – 2021.

85 f. il.

Orientadora: Carla Cristiane Silva.

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

1. Ansys Mechanical. 2. Flambagem lateral com torção. 3. ABNT NBR 8800 (2008). I. Silva, Carla Cristiane. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Avançado Piumhi*. III. Título.

CDD 624

Catálogo: Andreia Cristina Damasceno - CRB-6/1974

Diego Moreira Machado

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO
SOFTWARE ANSYS MECHANICAL E A NBR 8800:2008 PARA A FLAMBAGEM
LATERAL COM TORÇÃO DE VIGAS METÁLICAS SUBMETIDAS A CARGA
UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA**

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: 12 / 11 / 2021 pela banca examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Piumhi, 12 de novembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Carla Cristiane Silva, Professora**, em 12/11/2021, às 15:46, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Barbosa de Paiva, Professor**, em 12/11/2021, às 16:07, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Thais de Oliveira Azevedo, Professora Substituta**, em 16/11/2021, às 07:55, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Junior Henrique Canaval, Professor**, em 16/11/2021, às 15:43, 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 **1007467** e o código CRC **860E5B6D**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu pai, Fabiano Leal Machado, pois é devido a ele que tive a oportunidade de estudar. Agradeço a mim mesmo pela persistência e força de vontade para ter chegado até aqui. Agradeço a meu irmão, Bruno Moreira Machado, e familiares que sempre me apoiaram.

Agradeço aos amigos que fiz durante essa caminhada, pois foram de extrema importância na minha formação como pessoa, além de compartilharem bons e maus momentos.

Por fim, sou grato à minha orientadora, Carla Cristiane Silva, e a todos professores que tive no decorrer de minha trajetória. Cada um deles é responsável em grande parte pelo resultado obtido neste trabalho e em minha formação como profissional.

RESUMO

Com intuito de estudar a flambagem lateral com torção (FLT) em vigas de aço, foi realizado um estudo comparativo entre o método de cálculo proposto pela ABNT NBR 8800:2008 (analítico) e o Método dos Elementos Finitos por meio do *software ANSYS Mechanical* (numérico). A FLT é um estado-limite último que ocorre devido a translação lateral combinada com a torção, que pode resultar no colapso da estrutura. No estudo, foram utilizadas vigas metálicas com perfil I duplamente simétrico de alma não esbelta, biapoiadas com vínculo de garfo, mesas livres para se deslocar lateralmente e carga uniformemente distribuída em todo comprimento destravado, aplicadas na mesa superior (desestabilizante), inferior (estabilizante) e na semialtura da seção transversal. O procedimento analítico considera que a alma do perfil permanece rígida mesmo após a flambagem, em contrapartida, os métodos numéricos retratam de maneira mais realista a distorção que ocorre na alma durante a flambagem lateral com torção. Além disso, a ABNT NBR 8800:2008 leva em consideração apenas vínculos de garfo e carga aplicada na semialtura dos perfis. O foco da análise se deu na variação do comprimento destravado e da esbeltez da alma, além de cargas estabilizantes e desestabilizantes. Concluiu-se que a distorção não considerada pela norma influencia diretamente sobre o momento crítico elástico. Este, por sua vez, aumenta com a diminuição do comprimento destravado e com a elevação da esbeltez da alma. Muitos dos resultados obtidos são preocupantes e podem conduzir a situações contrárias à segurança, enquanto em outros, o efeito da distorção foi insignificante sobre o momento crítico elástico e pode ser desprezado.

ABSTRACT

In order to study the lateral torsional buckling (LTB) in steel beams, a comparative study was carried out between the calculation method proposed by ABNT NBR 8800:2008 (analytical) and the Finite Element Method using ANSYS Mechanical software (numerical). LTB is an ultimate limit state that occurs due to lateral translation combined with torsion, which can result in structure collapse. In the study, double symmetrical I-profile steel beams with non-slender web were used, with free warping and restrained twist in the both ends, flanges free to move laterally and uniform distributed load along the entire length, applied to the upper flange (destabilizer), bottom flange (stabilizer) and at half height of the cross-section. The analytical procedure considers that the web of the profile is rigid even after the initial deformation, on the other hand, the numerical methods portray in a more realistic way the distortion that occurs in the web during lateral torsional buckling. In addition, ABNT NBR 8800:2008 takes into account only free warping and restrained twist in the both ends and load applied at the semi-height of the profiles. The focus of the analysis was on the variation of the length and the web slenderness, in addition to stabilizing and destabilizing loads. It was concluded that the distortion not considered by the standard directly influences the elastic critical moment. This, in turn, increases with decreasing length and with increasing of the web slenderness. Many of the results obtained are worrisome and can lead to situations contrary to safety, while in others, the distortion effect was negligible on the elastic critical moment and can be neglected.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VIGA SUJEITA A FLT COM CARGAS DISTRIBUÍDAS	19
FIGURA 2 - EFEITO DA DISTORÇÃO DA ALMA.....	20
FIGURA 3 - PERFIL I E H.....	25
FIGURA 4 - UTILIZAÇÃO DE PERFIS METÁLICOS.....	26
FIGURA 5 - PARÂMETROS DE C_B	29
FIGURA 6 - LIMITES PARA O CÁLCULO DA FLT	30
FIGURA 7 - COMPRIMENTO DESTRAVADO.....	32
FIGURA 8 - COMPORTAMENTO DA VIGA DE ACORDO COM OS VÍNCULOS ...	33
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DOS VÍNCULOS.....	33
FIGURA 10 - DIAGRAMAS DE ACORDO COM ESFORÇOS ATUANTES	33
FIGURA 11 - POSIÇÃO DAS CARGAS.....	34
FIGURA 12 - VARIÁVEIS DA SEÇÃO TRANSVERSAL	34
FIGURA 13 - RECORTE NAS VIGAS.....	35
FIGURA 14 - PÁGINA INICIAL DO <i>SOFTWARE</i>	38
FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DA INTERFACE DO <i>ANSYS MECHANICAL 2020</i> <i>VERSÃO ESTUDANTIL</i>	38
FIGURA 16 - ETAPAS DE SOLUÇÃO PELO MEF	40
FIGURA 17 - CRONOGRAMA BÁSICO DE UM <i>SCRIPT</i>	41
FIGURA 18 - DISCRETIZAÇÃO DE MALHA EM ELEMENTOS FINITOS.....	43
FIGURA 19 - ELEMENTO FINITO	43
FIGURA 20 - MOMENTO APLICADO NAS PONTAS.....	44
FIGURA 21 - ORIENTAÇÃO DOS EIXOS	48
FIGURA 22 - ELEMENTO <i>SHELL 181</i>	49
FIGURA 23 - CARGA APLICADA NA SEMIALTURA	51
FIGURA 24 - CARGA APLICADA NA MESA INFERIOR	51
FIGURA 25 - CARGA APLICADA NA MESA SUPERIOR	52
FIGURA 26 - RESTRIÇÕES	53
FIGURA 27 - DENSIDADE DAS MALHAS.....	55
FIGURA 28 - COMPORTAMENTO DA VIGA	62

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - RAZÃO $M_{CR,ANA}/M_{CR,NUM}$ EM FUNÇÃO DO VÃO (L_B) E DA ESBELTEZ DA ALMA (H_W/T_W).	59
GRÁFICO 2 - RAZÃO $M_{CR,ANA}/M_{CR,NUM}$ EM FUNÇÃO DO VÃO (L_B) E DA ESBELTEZ DA ALMA (H_W/T_W).	63
GRÁFICO 3 - RAZÃO $M_{CR,ANA}/M_{CR,NUM}$ EM FUNÇÃO DO VÃO (L_B) E DA ESBELTEZ DA ALMA (H_W/T_W)	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MODELOS TESTADOS NOS CÁLCULOS NUMÉRICOS E ANALÍTICOS.....	47
TABELA 2 - VIGA PADRÃO PARA REFINAMENTO DA MALHA.....	54
TABELA 3 - TEMPO X RAZÃO ENTRE MALHAS.....	54
TABELA 4 - VALIDAÇÃO MODELO COM $C_B = 1$ E 1,14.....	56
TABELA 5 - MOMENTO CRÍTICO NUMÉRICO E ANALÍTICO COM CARGA NA SEMIALTURA.....	58
TABELA 6 - MOMENTO CRÍTICO NUMÉRICO E ANALÍTICO COM CARGA NA MESA INFERIOR.....	62
TABELA 7 - MOMENTO CRÍTICO NUMÉRICO E ANALÍTICO COM CARGA NA MESA SUPERIOR.....	64
TABELA 8 - TABELA RESUMO DE RESULTADOS.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISC - *American Institute of Steel Construction*

ANSI - *American National Standards Institute*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

APDL - *ANSYS Parametric Design Language*

ELU - Estados-Limites Últimos

ELS - Estados-Limites de Serviço

ESSS - *Engineering Simulation and scientific Software*

FD - Flambagem Distorcional

FLA - Flambagem Local da Alma

FLT - Flambagem Lateral com Torção

FLTD - Flambagem Lateral com Torção com Distorção da Alma

GUI - *Graphical User Interface* (Interface Gráfica do Usuário)

MEF - Método dos elementos finitos

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

PTV - Princípio dos Trabalhos Virtuais

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

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 do aço
G	módulo de elasticidade transversal
I_y	momento de inércia em relação a y
I_x	momento de inércia em relação a x
J	constante de torção
L_b	comprimento destravado
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	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
$M_{cr,ana}$	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	módulo elástico

Z_x módulo de resistência plástica da seção transversal em relação ao eixo x

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

b_f	largura da mesa da seção transversal
d	altura total da seção transversal
f_u	resistência à ruptura
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
n	número de subdivisões da malha
r_x, r_y, r_z	rotações em torno de x, y e z
t_f	espessura da mesa
t_w	espessura da alma
u_x, u_y, u_z	deslocamentos nas direções x, y e z
x, y, z	coordenadas cartesianas
x_0	centro de gravidade do tê comprimido

LETRAS GREGAS

β_1	coeficiente de correção para a esbeltez crítica
λ	índice de esbeltez
λ_p	índice de esbeltez relacionado a plastificação
λ_r	parâmetro de esbeltez relacionado ao início do escoamento
μ	deslocamento lateral
ν	coeficiente de Poisson para o aço
γ_{a1}	coeficiente de ponderação de resistência do aço
σ_r	tensão residual

θ ângulo de torção

ω empenamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações Gerais	17
1.2 Flambagem Lateral com Torção	19
1.3 Justificativa	20
1.4 Objetivos	21
<i>1.4.1 Objetivo geral</i>	<i>21</i>
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	<i>21</i>
1.5 Metodologia	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 O Aço na Construção Civil	23
2.2 Método Analítico Proposto pela NBR 8800 (2008)	26
<i>2.2.1 Viga de alma não esbelta</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2 Momento crítico elástico</i>	<i>28</i>
2.3 Fatores que Influenciam a FLT	32
2.4 ANSYS MECHANICAL	35
<i>2.4.1 Sobre o ANSYS</i>	<i>36</i>
<i>2.4.2 Interface</i>	<i>37</i>
<i>2.4.3 Inserção de dados, resolução e análise</i>	<i>39</i>
<i>2.4.4 Script</i>	<i>41</i>
2.5 Método dos Elementos Finitos (MEF)	42
2.6 Estudos Sobre a FLT	44
3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO	46
3.1 Generalidades	46
3.2 O Modelo Numérico	48
<i>3.2.1 Tipo de análise</i>	<i>49</i>

3.2.2 O elemento.....	49
3.2.3 O material utilizado	50
3.2.4 Condições de contorno	50
3.3 Refinamento da Malha	53
3.4 Validação do Modelo Numérico	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1 Influência da Esbeltez da Alma e do Comprimento Destravado	58
4.1.1 Carga aplicada na semialtura da alma	58
4.1.2 Carga aplicada na mesa inferior (Estabilizante).....	62
4.1.3 Carga aplicada na mesa superior (Desestabilizante).....	64
4.1.4 Resumo de resultados.....	67
4.2 Considerações.....	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
5.1 Conclusões.....	69
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

As possibilidades voltadas a projetos que contém estruturas metálicas, ou estruturas mistas de aço e concreto, trazem uma infinidade de avanços nos últimos anos no que diz respeito aos materiais, métodos construtivos ou formas de análise. A estrutura de aço é alvo de diversos estudos devido a sua elevada resistência, ótima ductilidade, agilidade na fabricação e na montagem, o que faz com que este seja um material bastante requisitado na construção civil.

É indispensável que se aborde maneiras de análise do comportamento do aço frente a solicitações de cargas, através de ensaios ou análises numéricas com uso de *softwares*, com intuito de simplificar e dar maior confiabilidade aos resultados obtidos. Os ensaios laboratoriais, em geral, têm custo elevado e dependem de equipamentos disponíveis. Dessa forma, os modelos computacionais tendem a ganhar cada vez mais espaço e representatividade por viabilizarem cálculos rápidos e precisos. A respeito disso, Silva (2009, p.2) diz:

Como os sistemas estruturais geralmente são formados por vigas, pórticos, treliças, placas e cascas, os engenheiros devem ter um bom conhecimento sobre o comportamento desses elementos quando submetidos a carregamentos de natureza estática e dinâmica. Sendo assim, as formulações numéricas e computacionais desenvolvidas com o Método dos Elementos Finitos ganham espaço e se mostram eficientes na solução dos problemas estruturais.

O *software* ANSYS utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) em suas análises. No MEF o problema contínuo é subdividido em elementos finitos, interconectados entre si através de pontos nodais. As subdivisões formam uma malha com geometria definida utilizada para realizar a análise numérica.

De acordo com Branchier (2017) caso busquem e sejam apresentados de maneira que se embasem na tecnologia da informação que está disponível no mercado, é possível que futuros engenheiros possuam cada vez mais aproximação com a realidade profissional ao saírem da faculdade. Portanto, torna-se necessário capacitar-se para gerir informações e aplicá-las via programas computacionais que facilitam a solução de problemas.

É indispensável o uso de tecnologias computacionais. Isso, aliado ao contexto global de constantes mudanças, faz com que a adaptação das instituições de ensino superior se dê no âmbito de tornar seus alunos menos passivos, uma vez que, no

sentido do progresso, os professores responsáveis por mediar o conhecimento buscam despertar o pensamento investigativo e crítico, além de contribuir com suas experiências e conhecimentos teóricos propostos. Isso é possível pelo fato das informações estarem cada vez mais disponíveis e de fácil acesso por meio de equipamentos eletrônicos. Dessa forma, torna-se cabível salientar a importância do equilíbrio entre o uso de *softwares* e os conhecimentos adquiridos na universidade para análise correta dos resultados. Além disso, quando, na prática de seu ofício, esses profissionais não forem capazes de verificar com precisão os resultados obtidos por programas computacionais, estarão mais aptos a buscar um meio que seja satisfatório para conclusão de suas tarefas.

As estruturas, em geral, são dimensionadas para suportar cargas de forma a cumprir suas funções com segurança e não exceder os seus estados limites últimos e de utilização. No entanto, ao ocorrer solicitações que venham a extrapolar a capacidade suportada por essas estruturas, as consequências podem ser diversas e vão desde o comprometimento da aparência e conforto à ruína do sistema. Segundo a ABNT NBR 8800 (2008), se um ou mais estados limites forem excedidos, a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada.

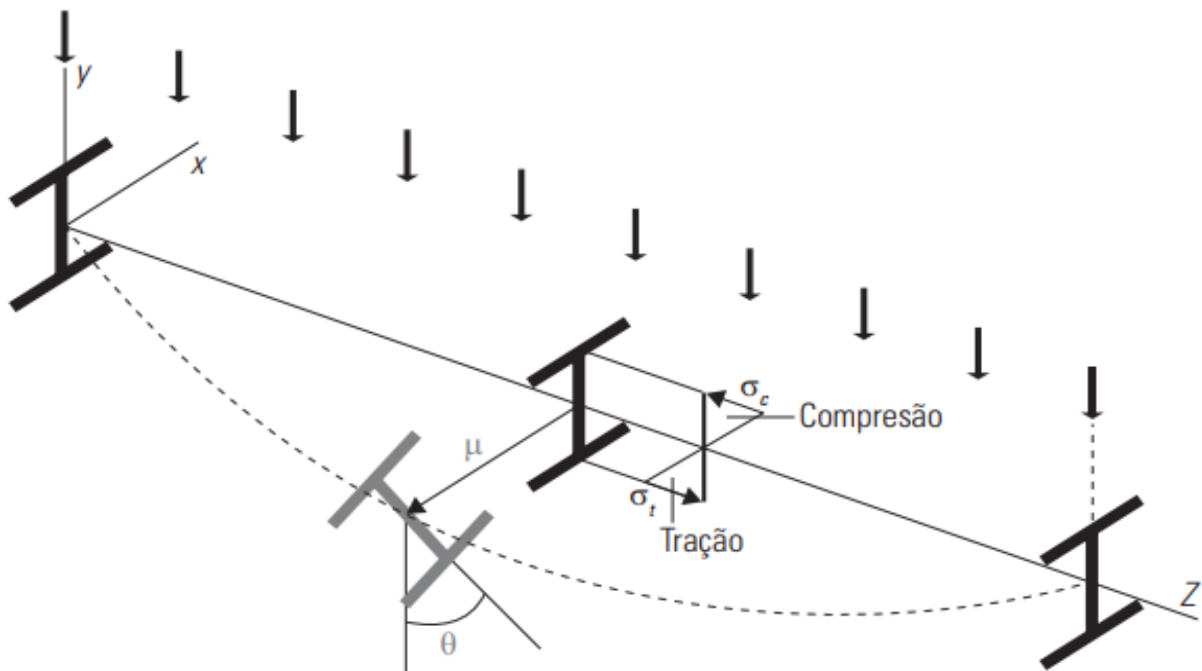
De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008) o estado-limite último (ELU) relaciona-se com a segurança das estruturas quando sujeitas às combinações de ações mais desfavoráveis seja em sua vida útil, no período de sua construção ou sobre influência de ações especiais ou excepcionais. Esse estado remete a ocorrência de escoamento, flambagem, instabilidade e/ou ruptura. Portanto, ao atingir essa condição, sabe-se que foi esgotada a capacidade portante da estrutura o que pode ocasionar colapso parcial ou total.

Entre os estados limites últimos que ocorrem com mais frequência nas vigas de aço está a flambagem lateral com torção (FLT) (REIS, 1996). De acordo com Fakury *et al.* (2016), levando-se em consideração a teoria clássica da flambagem, quando as imperfeições geométricas iniciais são desconsideradas, uma viga idealmente com eixo reto, apenas apresenta subitamente translação lateral (μ) e torção (θ) quando o momento fletor de colapso é alcançado. Nesse caso, tem-se um estado-limite último denominado flambagem lateral com torção.

1.2 Flambagem Lateral com Torção

A flambagem lateral com torção (FLT) é um estado-limite último (ELU) e trata-se de um modo de flambagem global causado pelo momento fletor no eixo de maior inércia. De acordo com Reis (1996), trata-se da instabilidade através da flexão lateral do perfil, perpendicular ao plano do carregamento, que se dá pelo deslocamento lateral (μ) combinada com torção (θ). Na Figura 1, a linha tracejada representa a deformada devido a flexão lateral e o perfil em cinza a torção, após a aplicação das cargas.

Figura 1 - Viga sujeita a FLT com cargas distribuídas



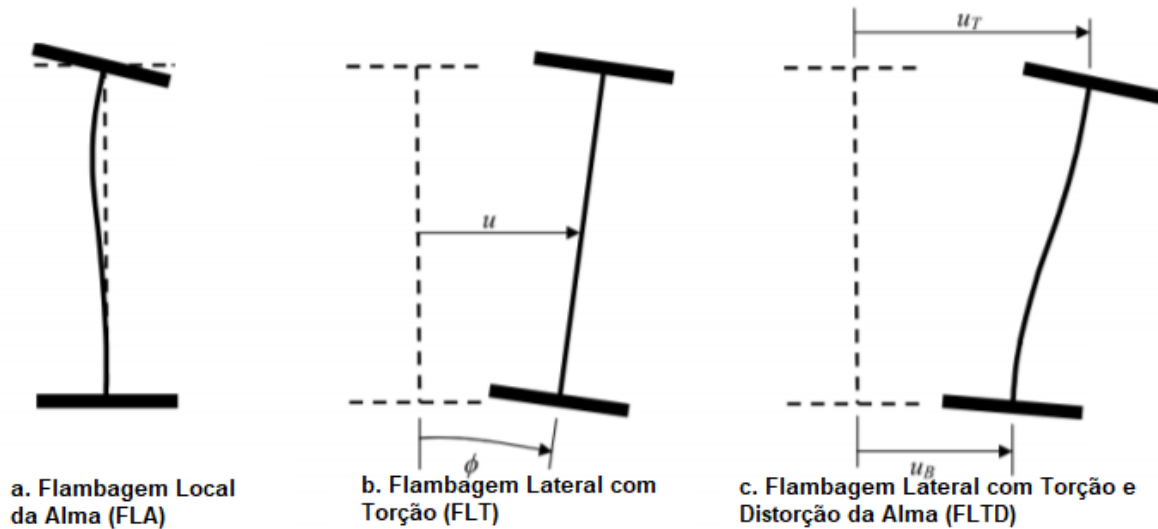
Fonte: FAKURY *et al.*, 2016.

De acordo com Silva (2017), a flambagem lateral com torção (FLT), no que diz respeito a teoria clássica da estabilidade, parte do princípio de que a seção transversal da viga se mantém indeformável no seu plano (Figura 2-b). Contudo, a alma das vigas pode sofrer distorção, fenômeno conhecido como distorção da alma ou flambagem local da alma (FLA) (Figura 2-a). A flambagem distorcional (FD) ou flambagem lateral com torção com distorção da alma (FLTD) (Figura 2-c) pode influenciar no momento crítico elástico de flambagem lateral e por consequência provocar redução no momento resistente.

Rossi (2018) traz que nas normas referentes a projetos em estruturas metálicas, como a ABNT NBR 8800 (2008), são apresentadas expressões analíticas

para o cálculo do momento crítico. No entanto, não são consideradas todas as premissas e parâmetros que o afetam, dentre essas, a distorção da alma combinada com a FLT. Já em *softwares* de análise numérica que utilizam o MEF, tal distorção é considerada de maneira integral.

Figura 2 - Efeito da distorção da alma



Fonte: Adaptada de ROSSI, 2018.

1.3 Justificativa

O método proposto pela NBR 8800 (2008) usa simplificações que desconsideram a distorção da alma ao calcular o momento crítico elástico para o fenômeno de flambagem lateral com torção, assim como os efeitos estabilizante e desestabilizantes das forças aplicadas. Essas desconsiderações podem ser relevantes frente a almas com esbeltez alta e para pequenos comprimentos destravados. Justifica-se dessa forma, a realização de uma análise comparativa do método analítico proposto pela norma e o Método dos Elementos Finitos (MEF) numérico proposto pelo *software ANSYS Mechanical*.

A análise crítica das possíveis diferenças entre os métodos é importante, visto que os resultados obtidos por meio do método normativo podem sofrer influência considerável dos parâmetros desconsiderados e um estudo aprofundado sobre o fenômeno se mostra de grande valia para um possível ajuste da formulação proposta.

É importante também, ampliar o conhecimento sobre o *software ANSYS Mechanical* com intuito de dar maior visibilidade à ferramenta e abrir caminho para futuros trabalhos voltados para programas de computador associados à Engenharia

Civil. Dessa forma contribuir para elevar a qualidade e confiabilidade de trabalhos relacionados a esse ofício.

Além disso, experimentos computacionais por meio do MEF têm se mostrado bastante precisos em comparação a experimentos físicos laboratoriais, uma vez que apresentam vantagem quanto ao uso reduzido de materiais e tempo para obtenção de resultados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo a análise comparativa dos resultados de momento crítico elástico de flambagem lateral com torção, entre o método proposto pela ABNT NBR 8800 (2008) e um modelo numérico desenvolvido no *software ANSYS Mechanical*, para vigas metálicas com perfil I duplamente simétrico, submetida a carga uniformemente distribuída no centro de torção, como especifica a norma, na parte superior e inferior, e vínculo de garfo nas extremidades.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analisar os momentos críticos elástico de flambagem lateral com torção, obtidos através do *software ANSYS*, variando o comprimento destravado (L_b) e a esbeltez da alma (h_w/t_w) para as vigas metálicas consideradas neste estudo.

- Analisar as mesmas vigas metálicas considerando o modelo proposto pela ABNT NBR 8800 (2008).

- Comparar os momentos críticos elásticos obtidos através do método analítico proposto pela ABNT NBR 8800 (2008) e pelo método numérico do *software ANSYS Mechanical*.

1.5 Metodologia

A metodologia foi pautada em experimentos computacionais e revisões bibliográficas. Com intuito de atingir os objetivos deste trabalho, as seguintes etapas foram seguidas:

- I. Estudo bibliográfico sobre o comportamento da flambagem lateral com torção em vigas metálicas, bem como a distorção da alma. Fatores que

influenciam o fenômeno e estudo do método de cálculo disponível na norma brasileira;

- II. Desenvolvimento de planilha eletrônica no “Planilhas Google” contendo o procedimento de cálculo do momento crítico elástico conforme a ABNT NBR 8800 (2008), além de tabelas para locação dos resultados obtidos pelo *software*;
- III. Determinação dos parâmetros dos perfis utilizados nas vigas para obtenção dos momentos críticos de acordo a NBR 8800 (2008);
- IV. Estudo do *software ANSYS* em sua versão *Mechanical APDL 2020 R2* versão estudantil, bem como a sua linguagem própria de programação, denominada APDL;
- V. Criação de um *script* padrão para realizar os testes no *ANSYS* de maneira rápida e facilitada, apenas com a mudança de variáveis. A partir dos parâmetros de entrada definidos pelo usuário, deverá gerar automaticamente a geometria e malha de elementos finitos, realizar análises não lineares e disponibilizar resultados de interesse;
- VI. Validação do *script* através da comparação dos resultados obtidos com trabalhos já validados;
- VII. Aperfeiçoamento e escolha da malha de elementos finitos no modelo numérico;
- VIII. Estudo paramétrico do modelo numérico para obtenção do momento crítico elástico com os dados pré-determinados;
- IX. Análise crítica do estudo comparativo, discussão dos resultados obtidos e conclusão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Aço na Construção Civil

De acordo com Bandeira (2008), no fim do século XVIII e início do XIX, a indústria siderúrgica buscou atender a grande demanda da Europa e dos Estados Unidos, em consequência do desenvolvimento do transporte ferroviário. Nesse contexto, surgia a necessidade de pontes e viadutos que são considerados as primeiras grandes aplicações do ferro e do aço nas construções. Considerado um marco histórico, a ponte sobre o rio Severn, na Inglaterra, foi construída entre 1775 e 1779, sendo considerada um grande avanço tecnológico, apesar de usar princípios semelhantes aos de pontes de madeira e pedra.

A pré-fabricação e montagem nos canteiros de obra foi de grande valia nessa época em que a sociedade industrial precisava de novos espaços construídos rapidamente e com baixo custo (BANDEIRA, 2008).

Bandeira (2008) retrata um princípio de edificações metálicas no Brasil, por meio de importações de estruturas vindas da Europa e somente na década de 80, após a implantação de diversas siderúrgicas nacionais, o Brasil alcançou patamar de excelência com produtos certificados por sua qualidade mundialmente. Já na década de 90 a construção civil nacional passou a ser consumidora em grande escala com aços estruturais desenvolvidos com alta resistência mecânica e à corrosão.

O aço é uma liga metálica de ferro e carbono, obtida pelo refinamento do ferro-gusa que pode conter outros elementos de acordo com sua finalidade (SCHLICHTING, 2018). Segundo Castro (2005), o uso do aço tem ganhado cada vez mais espaço no setor da construção civil, uma vez que consolida conceitos como modulação, industrialização e montagem. Mesmo com isso, segundo o autor, uma pequena parcela das edificações unifamiliares é estruturada em aço e que, quase em sua totalidade, o avanço desse setor se dá pelos empreendimentos de edifícios comerciais, industriais e residenciais.

Dentre as principais vantagens do aço, tem-se a resistência (principalmente em relação a seu peso), elevada ductilidade (grau de deformação antes de sua ruptura), confiança (material homogêneo e isotrópico com características bem definidas), canteiro de obras limpo e organizado (menos materiais envolvidos no processo construtivo), facilidade de reforço e ampliação, reciclagem e

reaproveitamento, rapidez de execução (FAKURY *et al.*, 2016). Como desvantagens, Schlichting (2018) traz as limitações das peças construídas em fábrica, devido também ao transporte, tratamento superficial contra corrosão e Fakury *et al.* (2016) complementa com as propriedades mecânicas que são prejudicadas em situação de incêndio com altas temperaturas.

Frente a um contexto que valoriza o meio ambiente e busca medidas ecologicamente corretas, o aço se destaca. Isso porque, segundo Abreu (2010), o aço pode ser reciclado um número ilimitado de vezes sem a perda de sua qualidade e de suas propriedades. Além disso, Parreiras (2001) ressalta que produtos oriundos de etapas da produção como a escória de alto forno e da aciaria, podem ser usadas na produção de cimento e na substituição da brita de pedra na construção civil, respectivamente.

Araújo (2019), traz que o aço na construção civil pode ser dividido em dois conjuntos principais, que são: com e sem fins estruturais. O grupo com fins estruturais engloba perfis soldados, laminados, chapas dobradas, vergalhões, eletro soldados, perfis leves para *Steel Frame*, enquanto os sem fins estruturais são voltados para telhas, tapamentos laterais, esquadrias, tubos, *etc.*

Fakury *et al.* (2016) ressalta que os elementos estruturais de aço são utilizados corriqueiramente na composição de treliças, pilares, vigas, contraventamentos, *etc.* Os perfis são projetados para suportar indistintamente tensões de tração e compressão, uma vez que se comportam muito bem sob ambas as tensões, embora sob compressão, se torna mais suscetível a problemas de instabilidade. Schlichting (2018) complementa que quando submetido à compressão, pode ocorrer flambagem. Neste caso, é necessário buscar pelo aumento da seção, ou diminuição do vão livre.

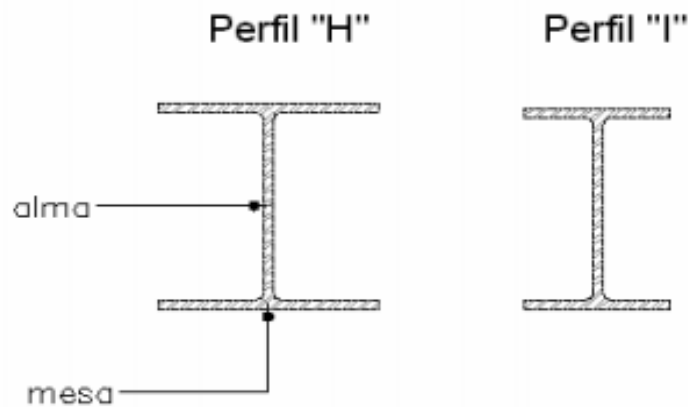
Os perfis estruturais, por sua vez, normalmente são soldados ou laminados. O primeiro é produzido por meio do corte, composição e soldagem de chapas planas, o que possibilita grande variedade de formatos e dimensões. O segundo é fabricado diretamente na linha de produção através de blocos e tarugos¹ que são trabalhados a quente até chegarem em formato “H”, “I” e cantoneira (L) (BANDEIRA, 2008). Dentre as seções transversais padronizadas, uma das mais utilizadas é o perfil I

¹ Tarugo: Em siderurgia, tarugo é um objeto sólido usado como matéria prima para a laminação.

(GONZALES, 2021). Esse perfil, assim como o “H”, quando laminado de faces paralelas recebe a designação W seguido pela altura nominal e sua massa por metro, da seguinte forma: W150x13 (150mm com 13 kg/m).

Na Figura 3 são representados os perfis laminados em “I” e “H”, enquanto a Figura 4 refere-se ao uso de alguns desses perfis na construção civil.

Figura 3 - Perfil I e H



Perfis Laminados de abas paralelas

Fonte: Adaptada de BANDEIRA, 2008.

No Brasil, a ABNT NBR 8800 (2008) é uma das responsáveis pela normatização de perfis para uso estrutural. Segundo as recomendações contidas nesta normativa, esse tipo de aço deve respeitar resistência ao escoamento no intervalo $250 \text{ MPa} \leq (f_y) \leq 450 \text{ MPa}$, relação f_u/f_y maior que 1,18. Sendo f_u a resistência à ruptura. Essa norma permite o emprego de aços estruturais de especificação norte americana ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Figura 4 - Utilização de perfis metálicos



Fonte: Adaptada de FAKURY *et al.*, 2016.

2.2 Método Analítico Proposto pela NBR 8800 (2008)

A NBR 8681 (2004) “Ações e segurança nas estruturas - Procedimento” apresenta requisitos de segurança e ações sobre estruturas civis. Tal norma possui, assim como a NBR 8800 (2008), sua proposta de cálculo baseada no Método dos Estados Limites. Em seu texto, traz como estados-limites aqueles a partir dos quais a estrutura apresenta comportamento não adequado às finalidades de construção.

Os estados-limites últimos (ELU) podem ser classificados, de acordo com essa normativa, como a máxima resposta da estrutura quando sujeita às combinações de ações mais desfavoráveis no decorrer de sua vida útil, de construção, ações especiais ou excepcionais. Relacionam-se a ELU comportamentos que levam à ruína como escoamento, flambagem, instabilidade e/ou ruptura.

Os estados-limites de serviço (ELS), por sua vez, relacionam-se com o desempenho da estrutura em condições normais de utilização. Isso remete ao conforto dos usuários tanto físico como psicológico frente a vibrações, deformações excessivas, além da estética desejada.

Bezerra *et al.* (2013) salientam a igualdade entre os procedimentos da norma regulamentadora americana ANSI/AISC 360-10 ao da ABNT NBR 8800 (2008). Santos e Vito (2016) por sua vez, tratam a revisão da norma brasileira de aço e

estruturas mistas de aço e concreto em 2008 como uma incorporação do que existia de mais moderno no mundo na época, uma vez que essa se baseou em regulamentações como: ANSI/AISC 360-05 (americana); EUROCODE 3 (EN 1993-1:2005) (europeia); e EUROCODE 4 (EN 1994-1:2005) (europeia), além de diversas outras regulamentações técnicas específicas.

De acordo com a norma brasileira, é necessário levar em consideração condições como: vínculo de garfo nas extremidades, seção transversal constante, forças externas à viga aplicadas na semialtura. Ressalta-se que a referida norma não considera a distorção da alma.

A análise proposta pela NBR 8800 (2008), consiste basicamente em duas possibilidades iniciais determinantes: Viga de alma esbelta e viga de alma não esbelta. Este trabalho se ateve apenas às vigas de alma não esbeltas. O tópico seguinte traz as especificações de cálculo desses tipos de vigas. A planilha eletrônica elaborada com o procedimento normativo está disponível em imagem no Anexo D.

2.2.1 Viga de alma não esbelta

As vigas de alma não esbelta, de acordo com a norma NBR 8800 (2008), devem possuir o parâmetro de esbeltez da alma (λ_w) menor ou igual ao parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento ($\lambda_{w,r}$). Portanto, quando a Equação 1 for maior que Equação 2 a viga é considerada esbelta.

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

$$\lambda_{w,r} = 5,7 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2)$$

Em que:

h : altura da alma (para os perfis soldados é a distância entre as faces internas das mesas, já para os perfis laminados é a distância entre as faces internadas das mesas subtraindo-se os dois raios de concordância entre mesa e alma).

t_w : espessura da alma.

E : módulo de elasticidade do aço (normatizado como 200.000 MPa).

f_y : resistência ao escoamento.

2.2.2 Momento crítico elástico

O comportamento resistente do aço frente ao estado limite último de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para uma viga I duplamente simétrica, fletida em relação ao seu eixo de maior inércia (x), é dado em função do momento crítico elástico (M_{cr}).

A norma traz, no anexo G, a Equação 3 disposta abaixo, juntamente com o procedimento de cálculo para determinação desse fator.

$$M_{cr} = \frac{C_b * \pi^2 * E * I_y}{L_b^2} * \sqrt{\frac{C_w * (1 + 0,039 * \frac{J * L_b^2}{C_w})}{I_y}} \quad (3)$$

Em que:

I_y : momento de inércia referente a seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma.

L_b : comprimento destravado entre seções contidas a flambagem lateral.

C_w : constante de empenamento da seção transversal.

J : constante de torção da seção transversal.

A Equação 3, segundo Silva (2016), é o produto da equação clássica da estabilidade para comprimentos destravados de vigas submetidas a momento fletor uniforme de Timoshenko e Gere (1961), reescrita de outra forma após algumas transformações algébricas e acréscimo do fator de modificação do diagrama de momento fletor não uniforme C_b .

O fator C_b leva em consideração a forma do diagrama de momento fletor ao longo do comprimento destravado, dessa forma constitui uma adequação para cada caso de carregamento. Em casos com diagramas desconhecidos, é necessário aplicar a Equação 4 que considera as duas mesas livres para se deslocar lateralmente (sem contenção lateral). Contudo, há também situações específicas com carregamentos e diagramas conhecidos, com isso é possível encontrar esses valores tabelados.

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

Em que:

$M_{m\acute{a}x}$: máximo momento fletor solicitante no comprimento destravado.

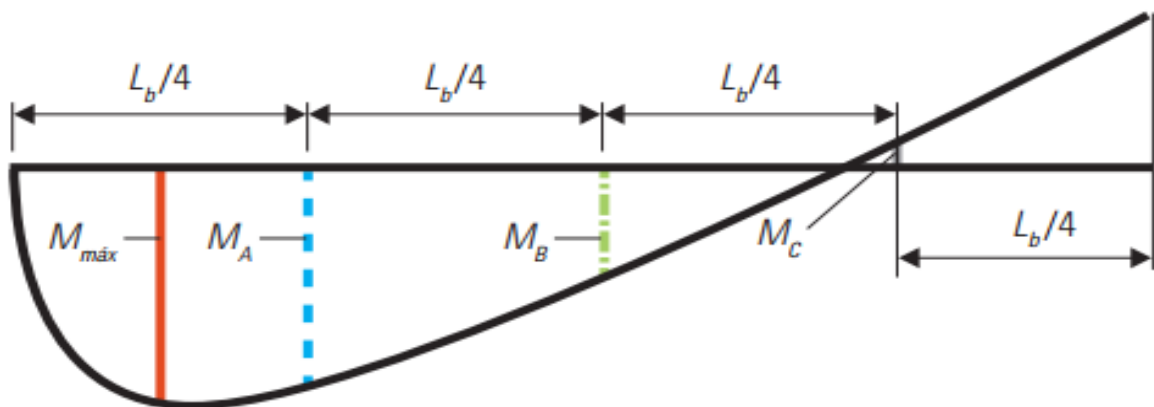
M_A : momento solicitante na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medida a partir da extremidade da esquerda.

M_B : momento solicitante na seção central do comprimento destravado.

M_C : momento solicitante na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medida a partir da extremidade da esquerda.

Na Figura 5, é possível verificar como são obtidos no diagrama os momentos que foram descritos acima.

Figura 5 - Parâmetros de C_b

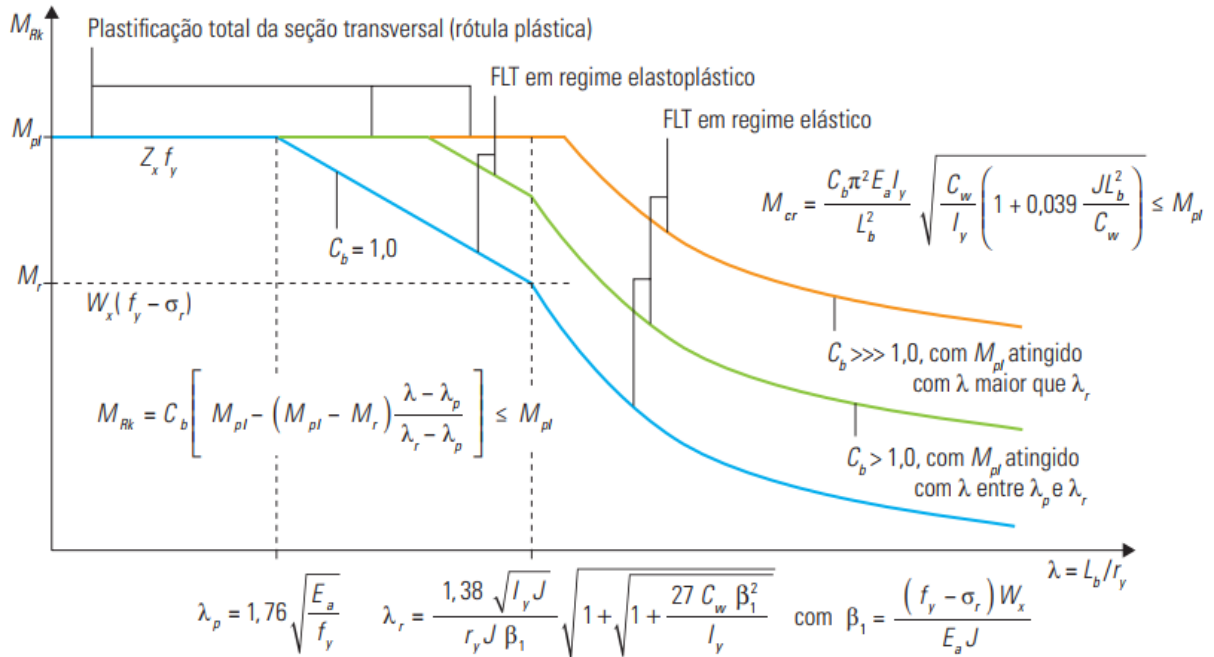


Fonte: Adaptado de FAKURY *et al.*, 2016

O momento de inércia referente ao eixo Y (I_y - perpendicular às mesas) é obtido através das características físicas do perfil. Dentre as propriedades geométricas I_y , C_w e J , a inércia é a que mais influência no valor do momento crítico e tem relação inversamente proporcional com a translação lateral (μ). A constante de empenamento (C_w) contém a torção (θ) de forma diretamente proporcional. A constante de torção da seção transversal (J) também contém a torção (θ) à medida que cresce.

Com intuito de calcular o momento crítico elástico devido a FLT em seções I de alma não esbeltas, é importante que os parâmetros λ , λ_r e λ_p estejam devidamente relacionados. Na Figura 6 é representado os limites para que a flambagem lateral com torção ocorra no regime elástico de maneira resumida.

Figura 6 - Limites para o cálculo da FLT



Fonte: FAKURY *et al.*, 2016.

Nota-se que para $\lambda \leq \lambda_p$ não ocorre flambagem lateral com torção e o momento resistente de cálculo pode ser determinado pela Equação 5.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

Uma vez que $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, ocorre FLT em regime inelástico e a determinação do momento resistente de cálculo é feita conforme a Equação 6.

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} * \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) * \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (6)$$

Já para $\lambda > \lambda_r$ ocorre flambagem em regime elástico e pela Equação 7 é possível estimar o momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (7)$$

A relação necessária para estar dentro do regime elástico respeita os parâmetros de esbeltez. Tais parâmetros são dados de acordo com as Equações 8 a 10.

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (8)$$

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

$$\lambda_p = 1,76 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (10)$$

Em que:

λ : parâmetro de esbeltez.

r_y : raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia (parâmetro geométrico), perpendicular ao eixo de flexão.

λ_r : parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.

L_r : comprimento destravado de início de escoamento.

β_1 : coeficiente de correção para esbeltez crítica.

Há um fator C_b implícito na Equação 9, que multiplica a equação, contudo de acordo com Fakury *et al.* (2016), a norma brasileira considera para essa formulação, que o valor de C_b é sempre 1. Tal fato permite que o valor da esbeltez (λ_r) seja independente do diagrama de momento fletor, o que traz segurança. Ressalta-se que essa consideração é apenas para a equação em questão.

Tem-se o momento fletor correspondente ao início do escoamento (M_r), disposto na Equação 11, que levando em consideração a tensão residual de compressão nas mesas, tida como 30% do valor da resistência ao escoamento ($\sigma_r = 0,3 * f_y$) e o módulo de resistência elástico da seção, fator geométrico relativo ao eixo de flexão (W):

$$M_r = (f_y - \sigma_r) * W \quad (11)$$

O comprimento destravado de início de escoamento (L_r) refere-se ao valor limite do comprimento destravado, para o qual a viga continue situada dentro do regime elástico. Seu cálculo possui, além de outros fatores já explicitados anteriormente, o fator de correção para esbeltez crítica (β_1) que pode ser calculado de acordo a Equação 12.

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) * W}{E * J} \quad (12)$$

É necessário também, que o momento crítico elástico não ultrapasse o momento fletor de plastificação (M_{pl}) da seção transversal que pode ser calculado através Equação 13.

$$M_{pl} = Z * f_y \quad (13)$$

Em que:

M_{pl} : momento fletor de plastificação da seção transversal.

Z: módulo de resistência plástico.

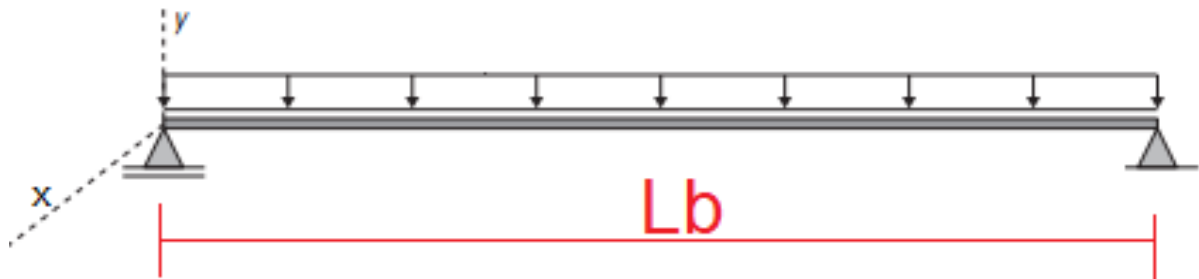
2.3 Fatores que Influenciam a FLT

São determinantes no fenômeno da flambagem lateral com torção, e sua compreensão pode tornar mais rica a análise de resultados.

De acordo com Reis (1996), os principais fatores que influenciam a FLT são:

- a) Comprimento da viga sem contenção lateral ou comprimento destravado (L_b) - Se trata de um fator inversamente proporcional ao momento crítico elástico. Na Figura 7 é representado o comprimento destravado;

Figura 7 - Comprimento destravado



Fonte: Adaptado de FAKURY *et al.*, 2016.

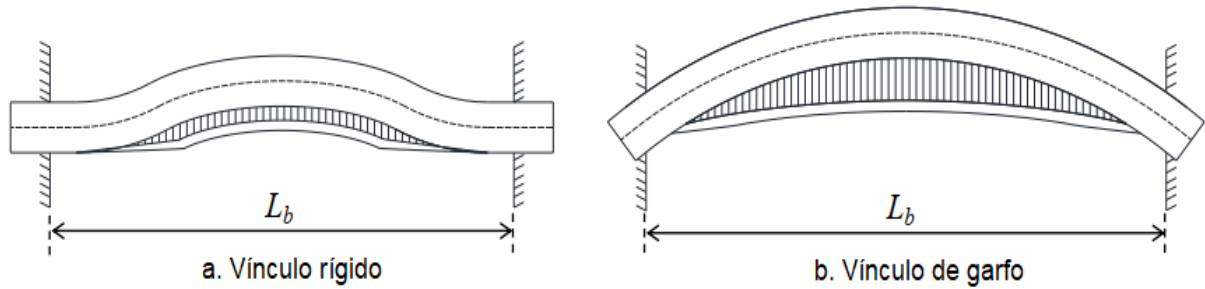
- b) Condições de contorno nas extremidades do comprimento destravado.

Na prática, as principais restrições são:

- a. torção e empenamento impedidos (vínculo rígido);
- b. torção impedida e empenamento liberado (vínculo de garfo).

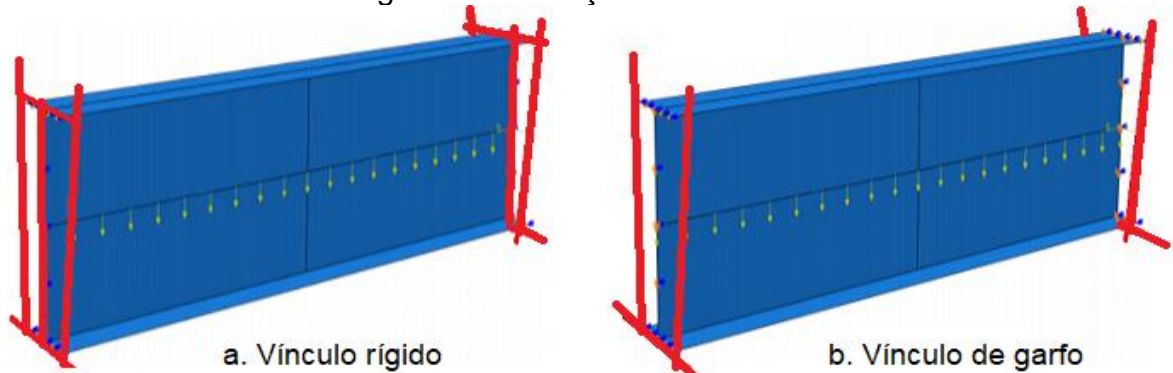
Na Figura 8 é demonstrado o comportamento de uma viga de acordo com cada condição apoio apresentada. Já a Figura 9 traz ilustrações com intuito de tornar visual a representação dos vínculos (representação em vermelho), e demonstrar como a Figura 9-b se assemelha a um garfo pela representação genérica do vínculo de garfo.

Figura 8 - Comportamento da viga de acordo com os vínculos



Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

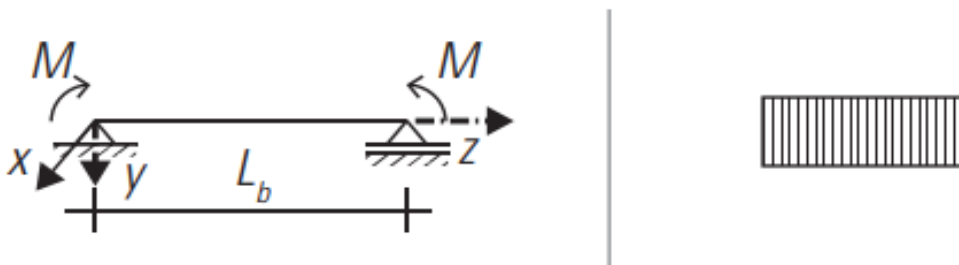
Figura 9 - Ilustração dos vínculos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

- c) Diagrama de momento fletor devido aos esforços atuantes;
 A variação do diagrama de momento fletor é levada em consideração pelo fator de modificação C_b . A situação mais crítica é de momento constante ao longo do comprimento destravado. A Figura 10 traz uma representação de esforços, bem como o diagrama correspondente.

Figura 10 - Diagramas de acordo com esforços atuantes

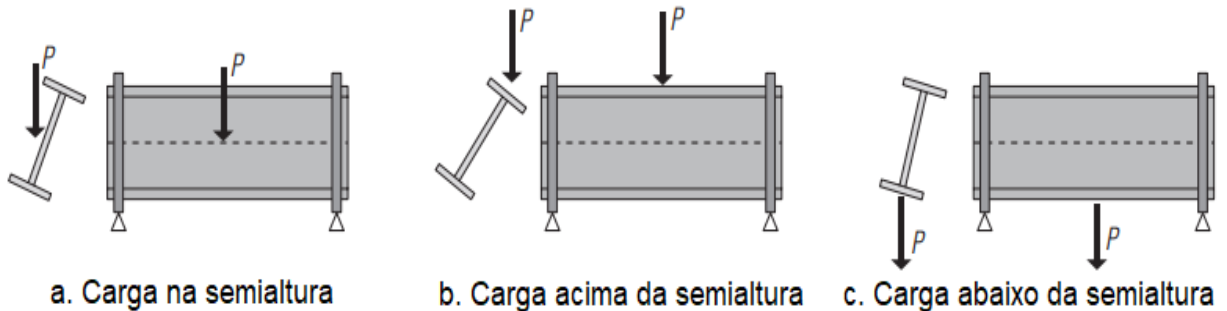


Fonte: FAKURY *et al.*, 2016.

- d) Local de aplicação das cargas em relação ao centro de torção:
- na semialtura (carga neutra);
 - acima da semialtura (carga desestabilizante);
 - abaixo da semialtura (carga estabilizante).

A Figura 11 ilustra os posicionamentos de cargas. Vale lembrar que a NBR 8800 (2008) considera somente o disposto no item “a”.

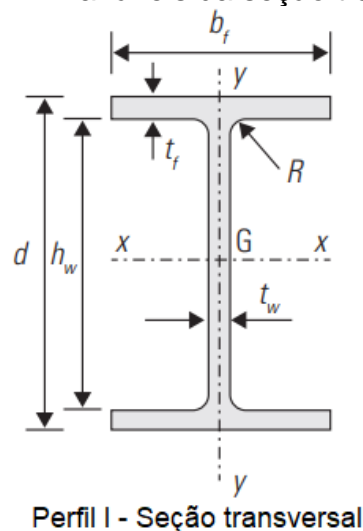
Figura 11 - Posição das cargas



Fonte: Adaptado de FAKURY *et al.*, 2016)

- e) Dimensões da seção transversal - Tanto a esbeltez das mesas (razão entre metade da largura da mesa e sua espessura), quanto da alma (razão entre a altura da alma e sua espessura) do perfil, faz com que a viga seja mais ou menos resistente. A Figura 12 retrata parâmetros da seção transversal do perfil I, onde identifica-se a largura das mesas (b_f), espessura das mesas (t_f), raio de concordância entre mesa e alma (R), espessura da alma (t_w), altura da alma (h_w), altura total (d) e centro geométrico (G). Os parâmetros x e y , por sua vez, correspondem respectivamente aos eixos horizontal e vertical, que passam pelo centro geométrico da seção.

Figura 12 - Variáveis da seção transversal

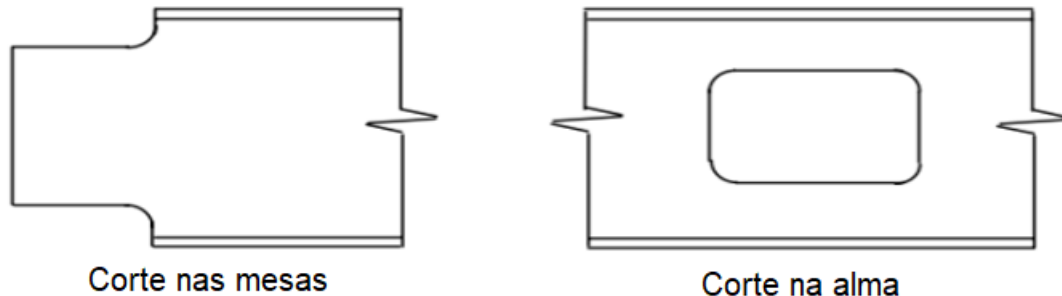


Fonte: FAKURY *et al.*, 2016.

- f) Recortes nas mesas e nas almas das vigas - Os recortes, conforme demonstrados na Figura 13, são feitos de acordo com especificações de

projeto e tem como finalidade a passagem de encaamentos, facilitar/permitir ligações entre peças, etc. O momento crítico elástico tende a diminuir com recortes.

Figura 13 - Recorte nas vigas



Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

2.4 ANSYS MECHANICAL

Programas utilizados e validados na engenharia, têm em comum a possibilidade de realizar suas análises baseadas em modelos de cálculo, com modelagem personalizada de acordo com a vontade de cada usuário. Dessa forma Carvalho *et al.* (1999) destaca que tais *softwares* permitem, por exemplo, o aproveitamento de dados de modelos arquitetônicos para simplificar o desenvolvimento de um modelo estrutural. Além de suas interfaces gráficas permitirem visualizar formas, ações, esforços, deslocamentos, armaduras e quantidade de materiais gastos.

A partir de diversos modelos pelos quais o projetista pode optar, levando em consideração as linhas gerais para início de elaboração conceitual da problemática, Carvalho (1994) destaca aqueles que tenham:

- a) a maior abrangência de informações;
- b) menor restrição de utilização;
- c) sido bem testados;
- d) facilidade de uso.

A respeito dessa questão, de acordo com Carvalho (1994, p. 5):

[...] é sempre importante que o usuário tenha consciência das hipóteses que norteiam o modelo empregado para conhecer seu alcance e, então, poder fazer uma análise mais realista dos resultados.

A análise estrutural visa determinar a resposta que estruturas darão sobre solicitação de cargas na prática, as tensões, deformações, forças atuantes, solicitações e deslocamentos são resultado disso e dependem, além das forças atuantes, das condições de contorno. Para Silva (2009) o projeto/dimensionamento estrutural, tem objetivo de definir os membros do sistema que apresentem uma melhor estabilidade e capacidade resistente para atender às solicitações encontradas na análise estrutural.

Silva (2009) relata em sua pesquisa, focada na análise computacional para análise de estruturas metálicas, que os projetos de estruturas são elaborados e calculados com a consideração de estruturas perfeitas e utilização de análise elástica linear. Devido a isso, as equações de equilíbrio formulam-se com base na configuração inicial sem deformação da estrutura, presumindo que as deformações possuem efeitos insignificantes.

Leinat (2017, *apud* SILVA, 2018) ressalta que com o advento computacional popularizou-se o Método dos Elementos Finitos. Isso levou ao cenário atual, no qual há inúmeras pesquisas desenvolvidas na área, avanços tecnológicos e a utilização de algoritmos baseados em elementos finitos no mercado de trabalho. Tal fato reflete indiretamente no acesso fácil e necessário aos estudantes de graduação, especialmente dos cursos de engenharia.

Com sua proposta de uso do Método dos Elementos Finitos para análise de estruturas, o *software ANSYS* tem crescido de forma notável no meio acadêmico. Destaca-se como característica diferenciável, a possibilidade de entrada de dados por meio de um arquivo em formato de texto (.txt). Este arquivo pode conter informações que vão desde as propriedades mecânicas e geométricas, até as condições de contorno, carregamentos, controle de análise, por meio da linguagem APDL do ANSYS (AYALA, 2017).

2.4.1 Sobre o ANSYS

O *software ANSYS* é ofertado pela empresa ANSYS® Inc. que atua desde 1970 como desenvolvedora de programas de simulação para engenharias. O programa não possui atuação limitada, suas aplicações são amplas e abrangem áreas automotivas, aeroespaciais, de construção, bens de consumo, energia, cuidados de

saúde, militares, entre outras (ESSS - *Engineering Simulation and scientific Software*, 2021).

Na Engenharia Civil, tem capacidade de realizar análises estruturais, de escoamento de fluidos, energética, entre outras lineares ou não. Possuem alcance para esse tipo de análise as extensões *ANSYS Mechanical*, *ANSYS Structural*, *ANSYS Multiphysics* e *ANSYS Professional* (ABREU, 2016).

É importante salientar que se trata de um *software* que traz a possibilidade de integração com outros, uma vez que aceita projetos em formatos variados (TXT, DWG, DXF, IGES, GIF, JPEG, SAT).

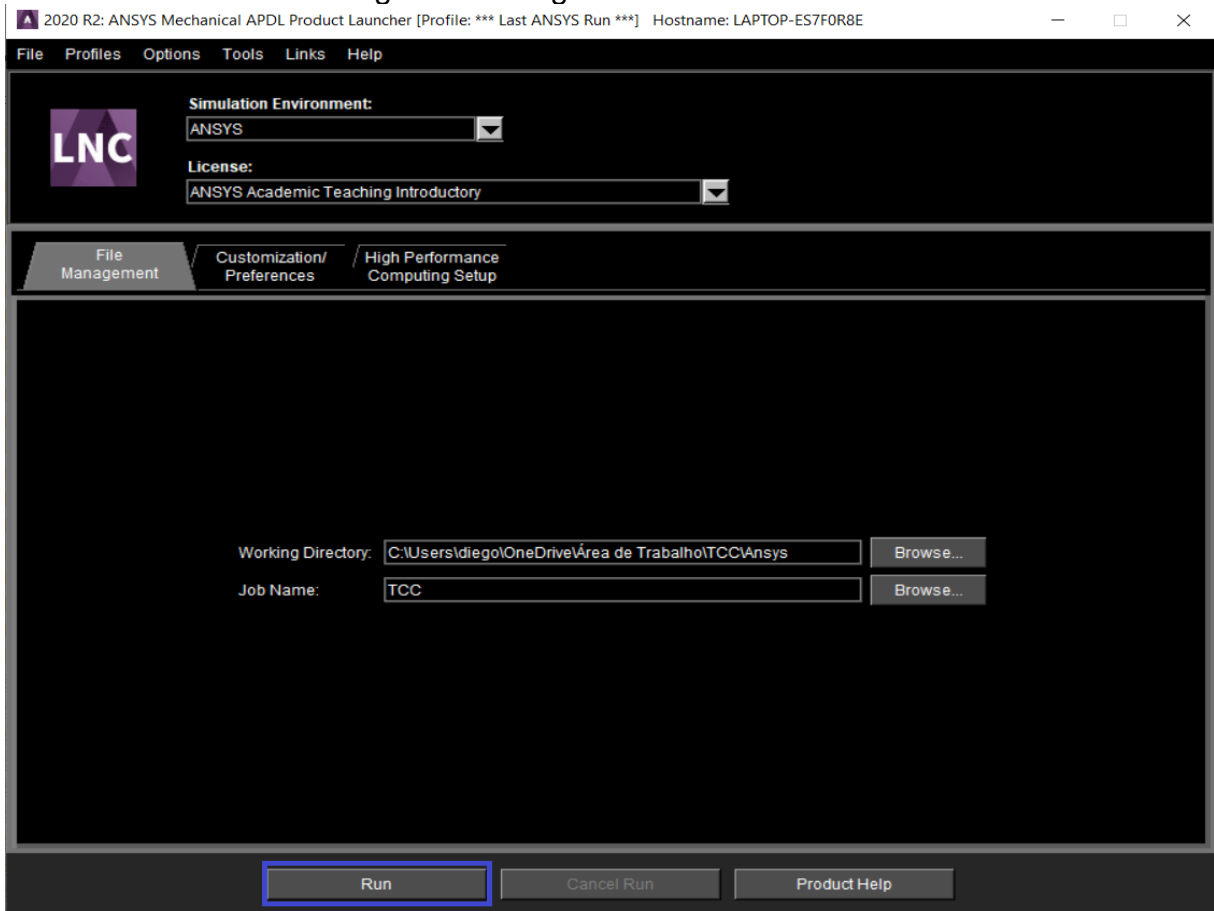
Todo processo desde a modelagem de um problema, resolução e análises pode ser realizado através de um menu de opções oferecido pela interface gráfica (GUI - *Graphical User Interface*), enquanto para usuários mais experientes, por uma barra de comandos que utiliza a linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) ou a elaboração de um arquivo contendo comandos em formato de texto.

A elaboração do mesmo protótipo e análise, com a variação de dimensões do perfil e refinamento da malha, pode despende tempo considerável se tiver de ser elaborada desde o início a cada vez que for necessário mudar algum parâmetro. Devido a esse fato, optou-se por um estudo da linguagem APDL e elaboração de um *script* (ver anexos A, B e C) contendo a sequência de comandos necessária para a análise desejada. Dessa forma, a cada experimento realizado, pode-se realizar mudanças apenas de determinados fatores propostos.

2.4.2 Interface

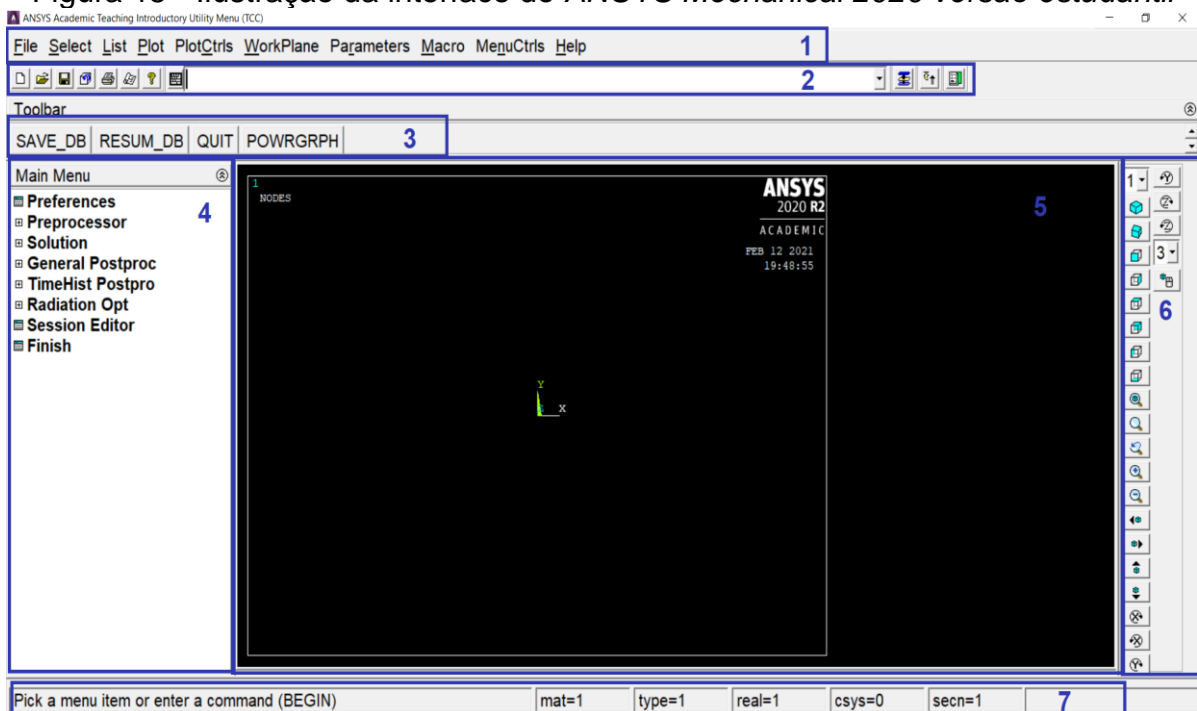
Ao abrir o *software ANSYS Mechanical*, depara-se com o apresentado na Figura 14. Nesta etapa são fornecidas algumas informações básicas a respeito do projeto:

Figura 14 - Página inicial do software



Fonte: Adaptada do *ANSYS Mechanical*, 2021.

Ao clicar em “Run”, a seguinte interface é apresentada (Figura 15):

Figura 15 - Ilustração da interface do *ANSYS Mechanical 2020 versão estudantil*

Fonte: Adaptada do *ANSYS Mechanical*, 2021.

Nessa interface já é possível começar a desenvolver projetos de acordo com a necessidade. No desenvolvimento com a própria linguagem APDL, pode-se recorrer ao “*help*” quando tiver dúvidas relacionadas a uma determinada ação.

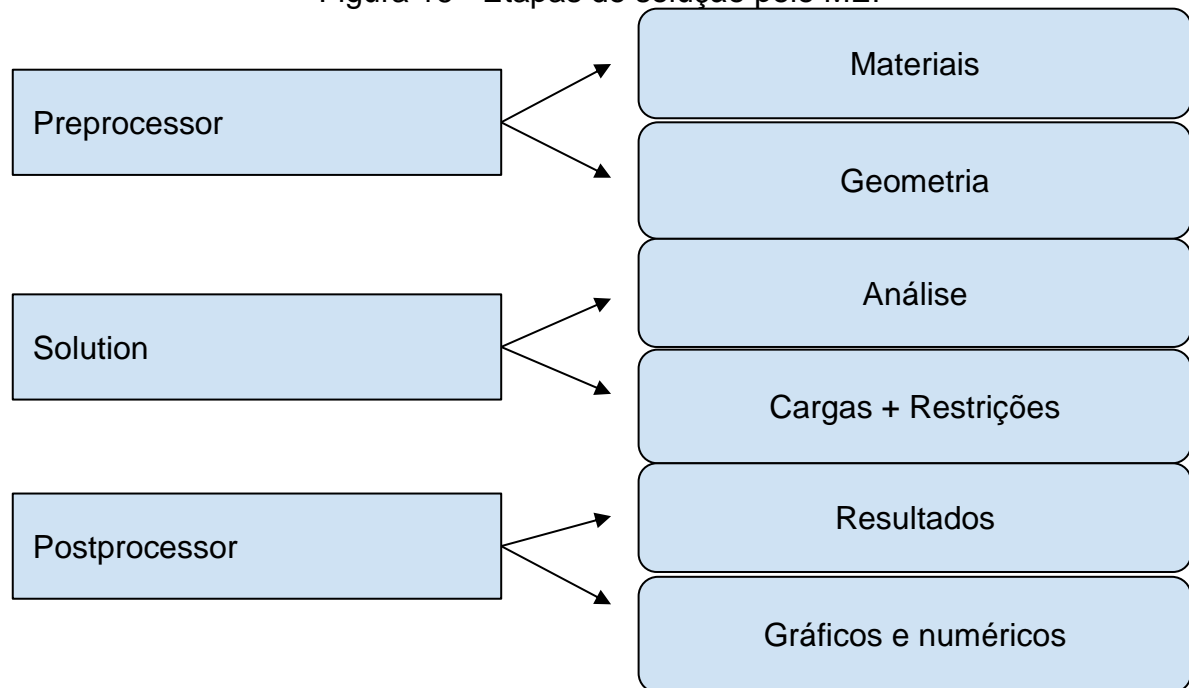
Abaixo são descritos os itens discriminados e numerados da Figura 15.

1. Menu utilitário: Funções gerais de controle, seleções e parâmetros. Neste menu, é possível destacar as funções *File*, *List*, *Plot*, *PlotCtrls* e *Help*.
2. Linha de comando e opções de acesso rápido como salvar, começar um novo modelo, impressão, e até mesmo o próprio *Help*. A linha de comando traz a possibilidade de modelagem via códigos em linguagem APDL, ou a colagem de um *script* pré-definido;
3. Barra com comandos usados com frequência. Pode-se adicionar mais opções de acordo com a preferência do usuário;
4. Menu principal: Nesse menu concentram-se as funções principais de modelagem sem o uso de códigos da linguagem do *software*. Portanto, são comandos executados basicamente através de cliques e inserção de dados. Destacam-se os menus *Preprocessor*, *Solution* e *General Postproc*;
5. Interface gráfica responsável por tornar visual os elementos, as condições aplicadas e as soluções obtidas;
6. Barra de visualização: local de controle das vistas e formas de visualização do projeto. Funcionam basicamente por meio de cliques;
7. Barra de status: demonstra em tempo real dados de itens selecionados.

2.4.3 Inserção de dados, resolução e análise

A análise baseada no MEF utilizada no programa, de acordo com Abreu (2016), independe da plataforma e percorre os passos interdependentes que consistem basicamente em 3 etapas descritas na Figura 16.

Figura 16 - Etapas de solução pelo MEF



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O processo de modelagem da estrutura, definição da geometria, de elementos (*Shell, Beam, Link, Conbin, etc*), constantes características, de materiais, condições de contorno, criação de malhas é feito através do menu “*Preprocessor*”. Podem ser estabelecidas, também neste menu, as forças atuantes e restrições de apoio, contudo normalmente são estabelecidas no menu “*Solution*”.

Na linguagem própria do *software*, proposta no *script*, o *ANSYS* entende que está na fase de pré-processamento, quando é utilizado o comando “*/prep7*”.

Na fase “*Solution*” é feita a inserção das cargas atuantes, das restrições de apoio, o tipo de solução desejada e a solução em si. A partir deste ponto é possível realizar uma gama de análises no menu “*Postprocessor*”. O comando em linguagem APDL que sinaliza o uso desse menu é o “*/solution*”.

A fase “*Postprocessor*” traz muitas opções de análise, que vão desde a visualização das deformadas, com coloração para melhor visualização e seus respectivos valores de deformação, até tabelas contendo valores de reações em cada nó pré-estabelecido, possibilidade de visualização do comportamento do elemento através do tempo, impressão de resultados, entre outras possibilidades. Em código, trata-se do comando “*/post1*”.

2.4.4 Script

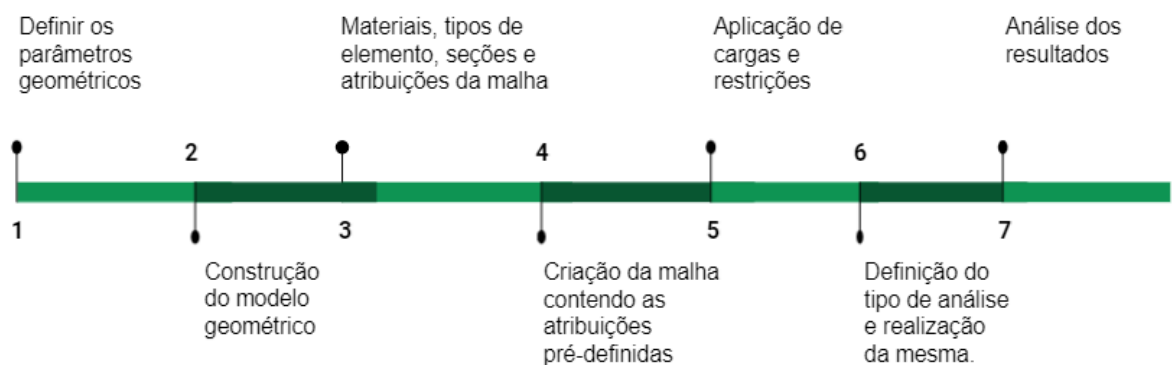
O *script* consiste em um arquivo de texto no qual são descritos, de forma ordenada, em linguagem de programação, os dados de entrada e a sequência de comandos que serão reproduzidos para as etapas de pré-processamento, solução e pós-processamento (BENICÁ, 2019).

Com intuito de simplificar o processo, o *script* deve possuir parâmetros de entrada (dimensões, malha, local de atuação de cargas, *etc*) facilmente alteráveis, com sua sequência em comandos automatizados que fazem uso desses parâmetros. Dessa forma, é possível realizar a análise numérica em vigas de perfil I duplamente simétricas, com variação dos parâmetros propostos com rapidez, praticidade e confiabilidade.

Algumas das etapas básicas para elaboração de um bom *script* consistem em definir o tipo de elemento a ser utilizado, propriedades mecânicas do material (como propriedades físicas e elásticas), propriedades geométricas do modelo (área, seção transversal, comprimento, *etc*). Após a caracterização inicial, é possível associar a malha de elementos finitos à estrutura. Aplica-se a força atuante e os tipos de apoio. Posterior a isso, define-se o tipo de cálculo desejado (análises estruturais lineares, não lineares, de flambagem, *etc*), e obtém-se por fim os resultados obtidos que podem ser listados, plotados, exportados, *etc*.

Na Figura 17, há, de maneira ordenada, o que foi descrito acima. Vale ressaltar que essa forma de elaboração não é tida como única e absoluta.

Figura 17 - Cronograma básico de um *script*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

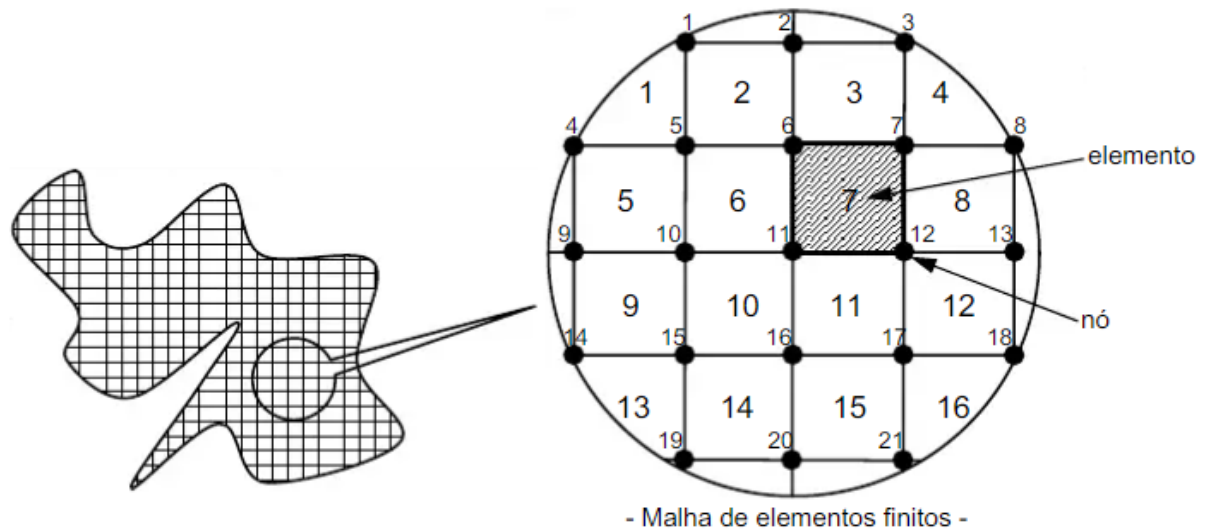
Com o *script* elaborado, torna-se possível a realização dos testes de forma sequencial e contínua. Pode-se fazer o lançamento do mesmo no *Prompt* de comandos, tanto completo, como em partes. É possível também, ordenar a leitura pelo *software* através do menu “*File*” com sua sequência em “*Read Input from*”, ou “Arquivo - Ler a entrada de” em tradução aberta.

2.5 Método dos Elementos Finitos (MEF)

De acordo com Yamassaki (2014), o Método de Elementos Finitos surgiu na indústria aeroespacial em meados da década de 50 para a análise estrutural de veículos aeroespaciais, contudo essa nomenclatura só foi adotada a partir de 1960. No Brasil, os primeiros estudos sobre MEF surgiram na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), na década de 70, em uma tese de doutorado. Ferreira *et al.* (2015) enfatizam que este método teve origem pela necessidade de procedimentos aproximados, com precisão aceitável, que pudessem ser aplicados independente da forma da estrutura e do tipo de carregamento.

Silva (2009), traz que essa técnica procura discretizar o meio contínuo em subdomínios, tratando-os como elementos interligados a pontos nodais, onde são definidos os graus de liberdade a serem determinados. Yamassaki (2014), ressalta que a solução é obtida apenas para pontos específicos do corpo contínuo, os nós, que em geral, localizam-se nas fronteiras dos elementos e proporcionam a ligação entre eles. Na Figura 18 é representado um objeto com geometria irregular, na qual buscou-se como solução aproximada, a discretização em diversos elementos finitos de geometria conhecida.

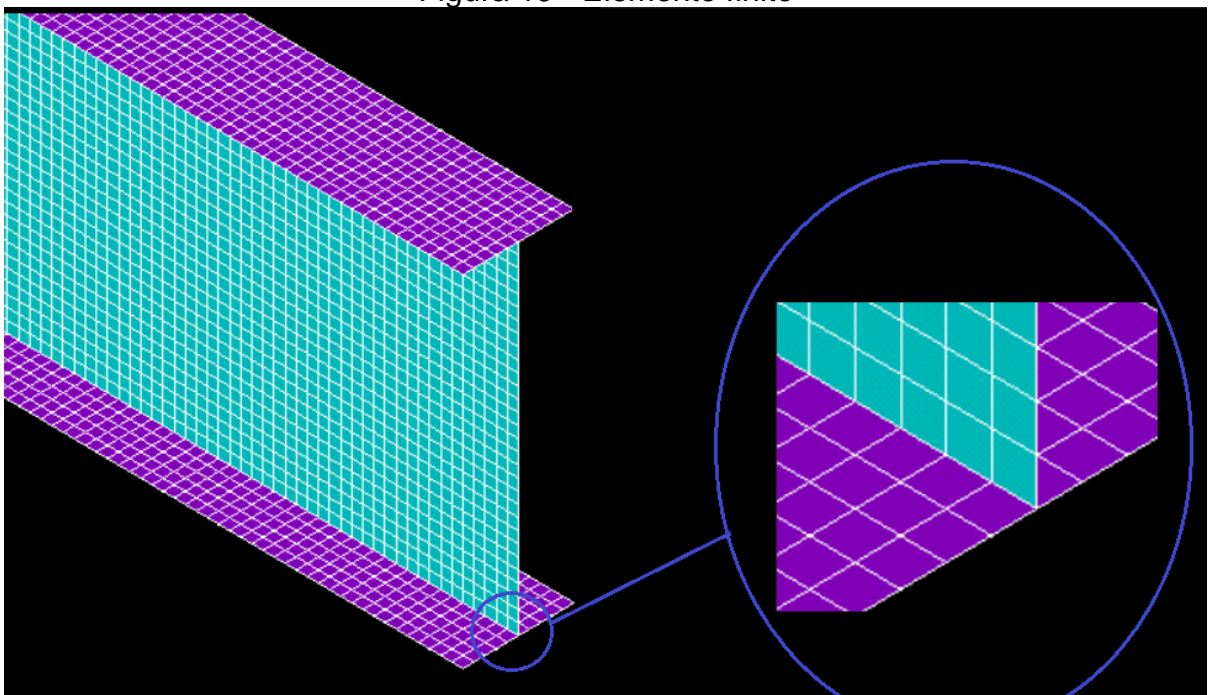
Figura 18 - Discretização de malha em elementos finitos



Fonte: CUNHA, 2012.

A metodologia de análise estrutural que tem como base o MEF, traz cada ponto material do corpo analisado como sendo função do tempo e de suas coordenadas (SILVA, 2017). As equações de equilíbrio são obtidas a partir do Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). Na Figura 19 a discretização de uma malha em elementos finitos (*SHELL181*) foi detalhada. Tal imagem foi elaborada pelo software ANSYS 2020, versão estudantil.

Figura 19 - Elemento finito



Fonte: Adaptada do ANSYS Mechanical, 2021.

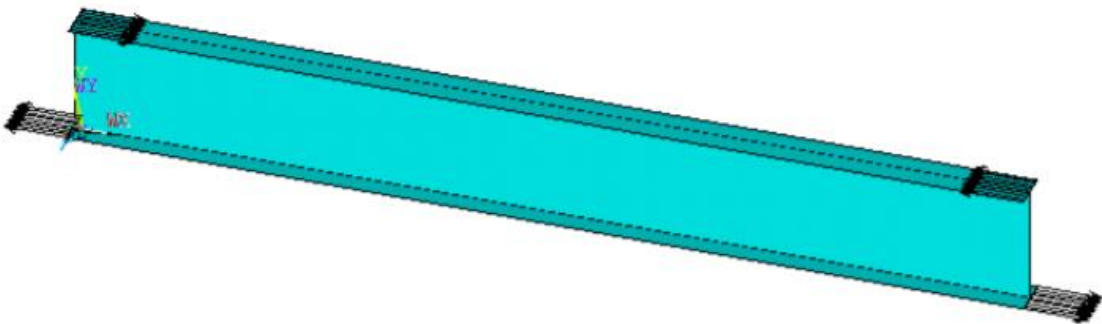
Os deslocamentos nodais funcionam como parâmetro para estabelecer o comportamento da estrutura. O estado de equilíbrio em um ponto, pode ser calculado através de funções de interpolação que respeitam a compatibilidade dos deslocamentos nos nós e assegura a continuidade das interfaces. Para isso, o deslocamento em um nó é igualmente percebido por todos os elementos a ele conectado (YAMASSAKI, 2014).

Uma questão importante ao elaborar um modelo numérico é a calibração, uma vez que sempre se obterá resultados e nem todos são necessariamente confiáveis. Para tal, é feito um estudo comparativo entre os dados obtidos com experimentos práticos ou ainda estudos relevantes com características semelhantes (VELLASCO *et al.*, 2014).

2.6 Estudos Sobre a FLT

Gonzales (2021) utilizou em sua pesquisa, padrões de esbeltez da alma entre 20 e 120, com razão h_d/L_b entre 1/8 e 1/20 e momento uniforme aplicado nas extremidades, conforme a Figura 20, e concluiu que para comprimentos destravados menores e esbeltez da alma mais elevada, houveram maiores discrepâncias entre as soluções, com resultados numéricos majoritariamente inferiores.

Figura 20 - Momento aplicado nas pontas



Fonte: GONZALES, 2021.

Vale ressaltar, de acordo com Silva (2017), que em vigas submetidas a momento uniforme, a alma não está sujeita a tensões de cisalhamento, o que torna a influência da distorção da alma pequena. Já para cargas pontuais e uniformemente distribuída as vigas são solicitadas por tensões de cisalhamento, o que influi mais para a redução da capacidade resistente à flambagem lateral com torção com distorção da alma (FLTD).

Rossi (2018), usou em sua pesquisa os *softwares* ABAQUS e GBTUL, enquanto Silva (2017) fez uso do *software* ABAQUS. Ambos os *softwares* fazem uso do Método dos Elementos Finitos. Em seus resultados sobre a influência da distorção da alma na FLT chegaram a conclusões de que para comprimentos destravados menores e esbeltez da alma maior, há discrepância considerável entre o método proposto pela ABNT NBR 8800 (2008) e as resoluções com uso do MEF, que simula com grande proximidade a realidade.

Portanto, tais autores alcançaram resultados que demonstram que o aumento da influência da distorção da alma no momento resistente à flambagem lateral com torção, cresce à medida que se reduz o comprimento destravado e se eleva a esbeltez da alma.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

Aqui serão apresentados os modelos numéricos, bem como suas informações, tais como elemento utilizado, tipos de análise, material utilizado, características geométricas, condições de contorno e de carregamento, validação do modelo, etc.

3.1 Generalidades

De acordo com Abreu (2016), para iniciar o desenvolvimento de um modelo no ANSYS, primeiramente é necessária uma consistente caracterização do problema real. Dessa forma, o *script* para materialização do problema real através do *software ANSYS Mechanical*, foi elaborado levando em conta as considerações descritas neste capítulo. Paralelo a isso, a planilha com o procedimento analítico proposto pela ABNT NBR 8800 (2008), levou em consideração os mesmos parâmetros, com exceção dos intrínsecos ao *software*.

Análises lineares, ou seja, considerando a geometria inicial das vigas (indeformada), foi realizada. Considerou-se vigas de perfil I duplamente simétricas, com comprimento destravado igual ao comprimento do vão, com simulação de vínculos de garfo nas extremidades, conforme proposto pela norma 8800 (2008).

As cargas foram aplicadas no sentido do eixo vertical (paralelo à alma) e as vigas consideradas fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma. Fakury *et al.* (2016), considera tal situação como uma análise semelhante ao que realmente acontece na prática.

Foram testados modelos com altura (d) igual a 60 cm, largura da mesa (b_f) de 20 cm e espessura da mesa (t_f) 1,6 cm. Esses parâmetros foram mantidos constantes. Variou-se a espessura da alma (t_w) de maneira que a esbelteza da mesma (λ_w), dada pela razão h_w/t_w , correspondesse a 20; 40; 45,44; 60; 80; 100 e 120. Dessa forma, obteve-se valores de espessura respectivamente iguais a 2,840 cm; 1,420 cm; 1,250 cm; 0,947 cm; 0,710 cm; 0,568 cm e 0,473 cm. Tais valores são próximos a valores comerciais, mas não necessariamente iguais, visto o caráter experimental do estudo. A Figura 12, apresentada anteriormente, retrata as dimensões citadas acima.

A esbeltez da alma correspondente a 45,44 ocorreu, pois estabeleceu-se como espessura inicial da alma o valor 1,250 cm, a partir de então, chegou-se aos outros valores de espessura. O coeficiente h_w refere-se à altura da alma.

O comprimento longitudinal das vigas é igual ao comprimento destravado, isto é, entre os apoios. Assegurou-se a razão h_o/L_b entre 1/8 e 1/20, que segundo Silva (2017) é uma faixa que cobre situações usuais, com variação apenas do comprimento, o que resultou em valores de L_b arredondados iguais a 480 cm; 720 cm; 960 cm e 120 cm. O coeficiente h_o corresponde à altura da alma somada à meia altura de cada mesa.

Para cada um desses comprimentos destravados, foram realizadas as variações de esbeltez da alma, conforme dito anteriormente. Para cada variação, as cargas foram aplicadas acima da viga, no meio da alma e abaixo da viga, o que resultou em 84 experimentos.

Na Tabela 1 são apresentadas as 28 geometrias testadas para cada posição de carga (na semialtura, na mesa superior e na mesa inferior)

Tabela 1 - Modelos testados nos cálculos numéricos e analíticos

Modelo	L_b (cm)	d (cm)	h_w (cm)	h_o (cm)	b_f (cm)	t_f (cm)	t_w (cm)	h_o/L_b	h_w/t_w
1	480	60	56,8	58,4	20	1,6	2,840	1/8	20
2	480	60	56,8	58,4	20	1,6	1,420	1/8	40
3	480	60	56,8	58,4	20	1,6	1,250	1/8	45,44
4	480	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	1/8	60
5	480	60	56,8	58,4	20	1,6	0,710	1/8	80
6	480	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	1/8	100
7	480	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	1/8	120
8	720	60	56,8	58,4	20	1,6	2,840	1/12	20
9	720	60	56,8	58,4	20	1,6	1,420	1/12	40
10	720	60	56,8	58,4	20	1,6	1,250	1/12	45,44
11	720	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	1/12	60
12	720	60	56,8	58,4	20	1,6	0,710	1/12	80
13	720	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	1/12	100
14	720	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	1/12	120
15	960	60	56,8	58,4	20	1,6	2,840	1/16	20
16	960	60	56,8	58,4	20	1,6	1,420	1/16	40
17	960	60	56,8	58,4	20	1,6	1,250	1/16	45,44
18	960	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	1/16	60
19	960	60	56,8	58,4	20	1,6	0,710	1/16	80
20	960	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	1/16	100
21	960	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	1/16	120

22	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	2,840	1/20	20
23	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	1,420	1/20	40
24	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	1,250	1/20	45,44
25	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	0,947	1/20	60
26	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	0,710	1/20	80
27	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	0,568	1/20	100
28	1200	60	56,8	58,4	20	1,6	0,473	1/20	120

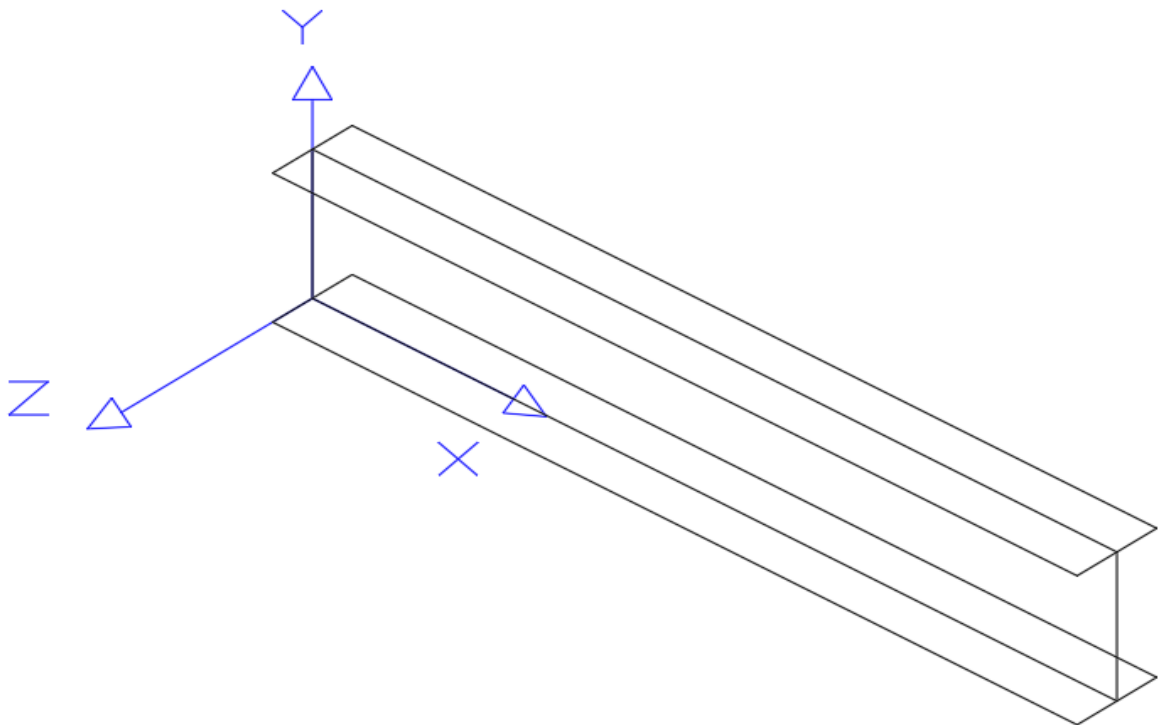
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

3.2 O Modelo Numérico

A geometria foi elaborada com a inserção de retângulos, tanto para as mesas, quanto para as almas. A partir do plano de trabalho principal, foram adicionadas espessuras, mantendo os planos iniciais centralizados. A origem do modelo foi padronizada na metade da altura da mesa inferior, centralizada em relação a sua largura, na extremidade esquerda da viga.

Os eixos foram situados conforme a Figura 21. Em que o “x” se encontra na direção longitudinal do comprimento destravado, “y” paralelo a alma e perpendicular às mesas e “z” perpendicular à alma.

Figura 21 - Orientação dos eixos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

3.2.1 Tipo de análise

Análises lineares foram realizadas para a flambagem foram realizadas, considerando-se o comportamento elástico-linear do material e geometria original ou indeformada das vigas.

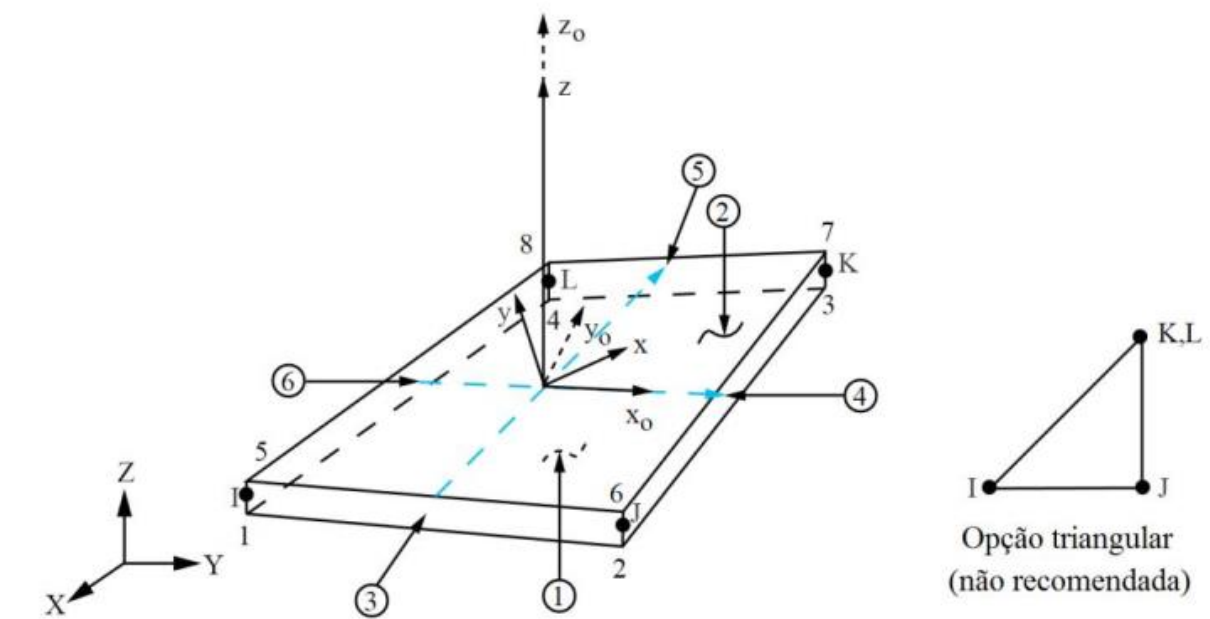
3.2.2 O elemento

O sistema ANSYS possui diversos tipos de elementos finitos pré-estabelecidos. Como elementos estruturais, são citados: elementos de barras, elementos de casca, elementos sólidos, elementos de mola, elementos de contato, elementos tubulares e elementos com funções estruturais específicas (ABREU, 2016).

Neste estudo, foi utilizado o elemento *SHELL181*, que é um elemento do tipo casca com quatro nós, cada nó com seis graus de liberdade (3 translações e três rotações no sistema de coordenadas x , y e z), curvatura dupla, integração completa e com deformação finita de membrana. Nesse tipo de elemento a distorção da alma é naturalmente incorporada aos resultados.

Na Figura 22 é demonstrada a geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para o elemento *SHELL181*.

Figura 22 - Elemento *SHELL181*



Fonte: *Help do ANSYS*.

Em que os números 1 a 8 sem circunferências são vértices. Já os números 1 a 6 circulados referem-se aos eixos coordenados, bem como representação de locais indefinidos. As letras I, J, K e L representam os nós.

De acordo com o manual do ANSYS (2020), o elemento *SHELL181* é adequado para análise de estruturas de casca fina a moderadamente espessas. Ainda há recomendações a respeito da geometria do elemento, pois apesar desse tipo de elemento ser disponibilizado no formato triangular e quadrilátero, os triangulares devem ser utilizados apenas como preenchimento na geração de malha em geometrias complexas. Portanto, não é recomendado o uso de geometrias triangulares. Neste trabalho, deu-se preferência aos elementos quadriláteros.

3.2.3 O material utilizado

O aço, com módulo de elasticidade (E ou E_a) de 200.000 MPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3, foi utilizado, conforme a NBR 8800 (2008).

3.2.4 Condições de contorno

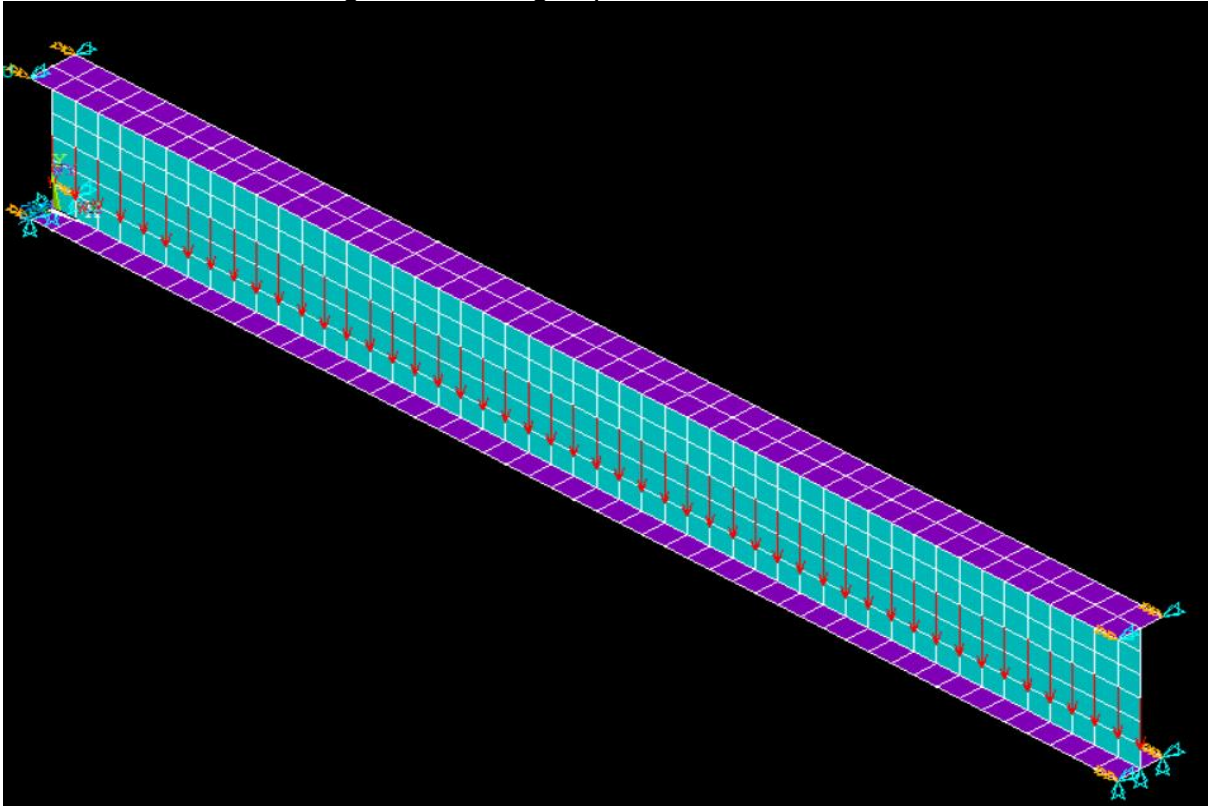
O MEF obtém a solução de um sistema de equações diferenciais parciais, definidas por um dado conjunto de carregamento e restrições (condições de contorno).

3.2.4.1 Cargas

Primeiramente, casos de cargas aplicadas na semialtura da seção transversal foram estudados, de acordo com o que prescreve a ABNT NBR 8800 (2008). Posteriormente, análises com cargas aplicadas na mesa superior e inferior foram realizadas, uma vez que em situações reais as cargas encontram-se normalmente situadas na mesa superior e/ou inferior. A carga uniformemente distribuída foi aplicada nos nós, na altura indicada, totalizando uma força de 1 kN/m.

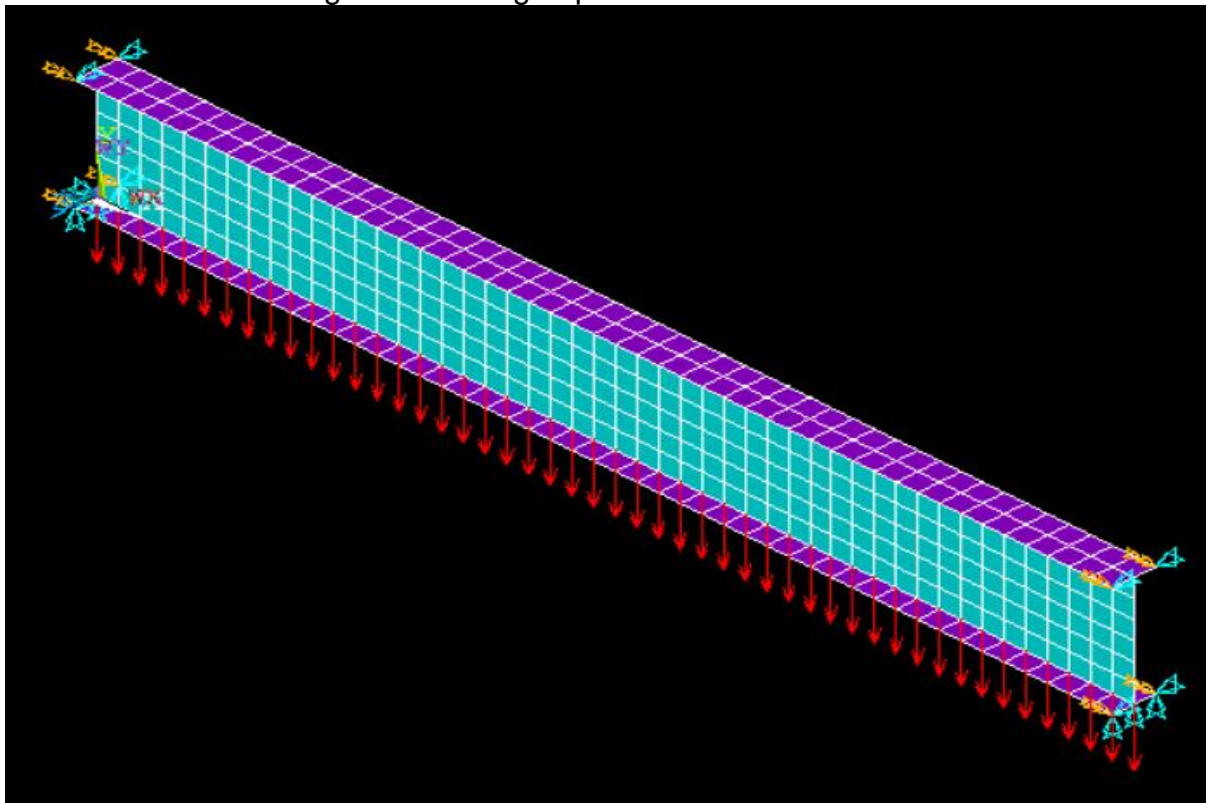
Na Figura 23 são demonstradas as cargas aplicadas na semialtura da seção transversal, conforme propõe a norma, enquanto na Figura 24 é retratada a carga estabilizante, aplicada na mesa inferior, e na Figura 25 percebe-se a carga desestabilizante, aplicada na mesa superior.

Figura 23 - Carga aplicada na semialtura



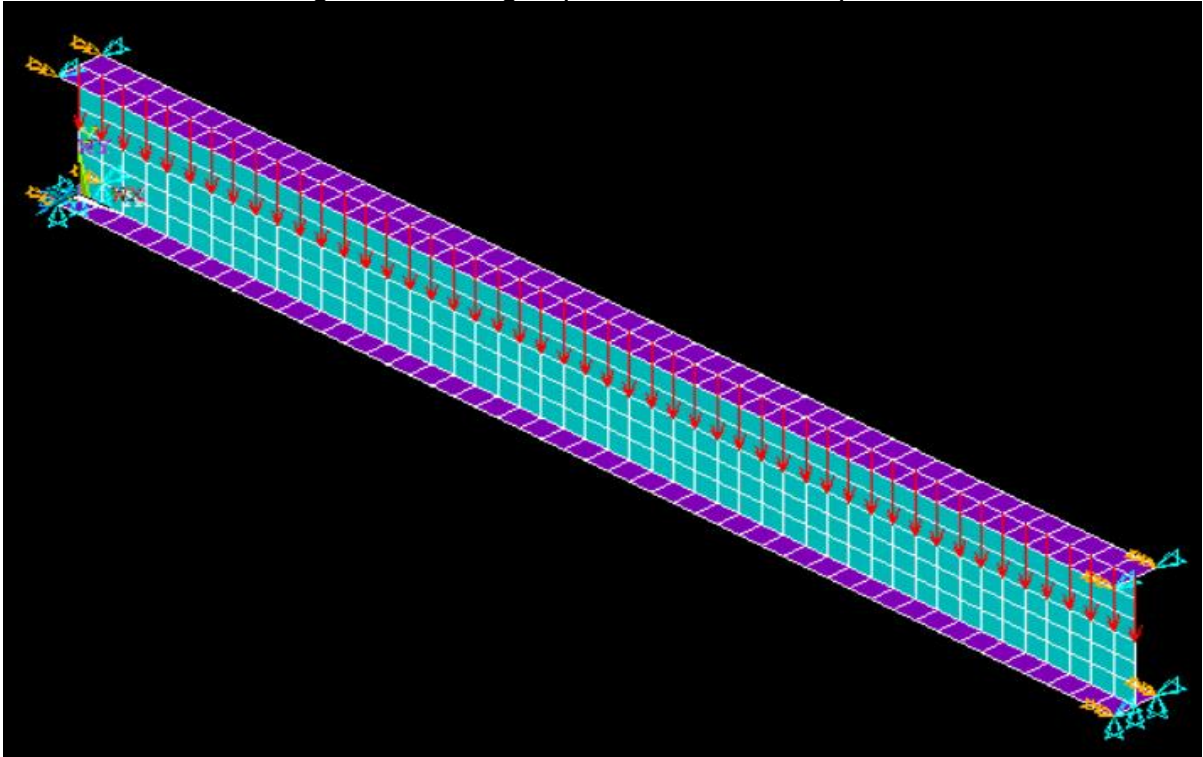
Fonte: Adaptada do ANSYS, 2021.

Figura 24 - Carga aplicada na mesa inferior



Fonte: Adaptada do ANSYS, 2021.

Figura 25 - Carga aplicada na mesa superior



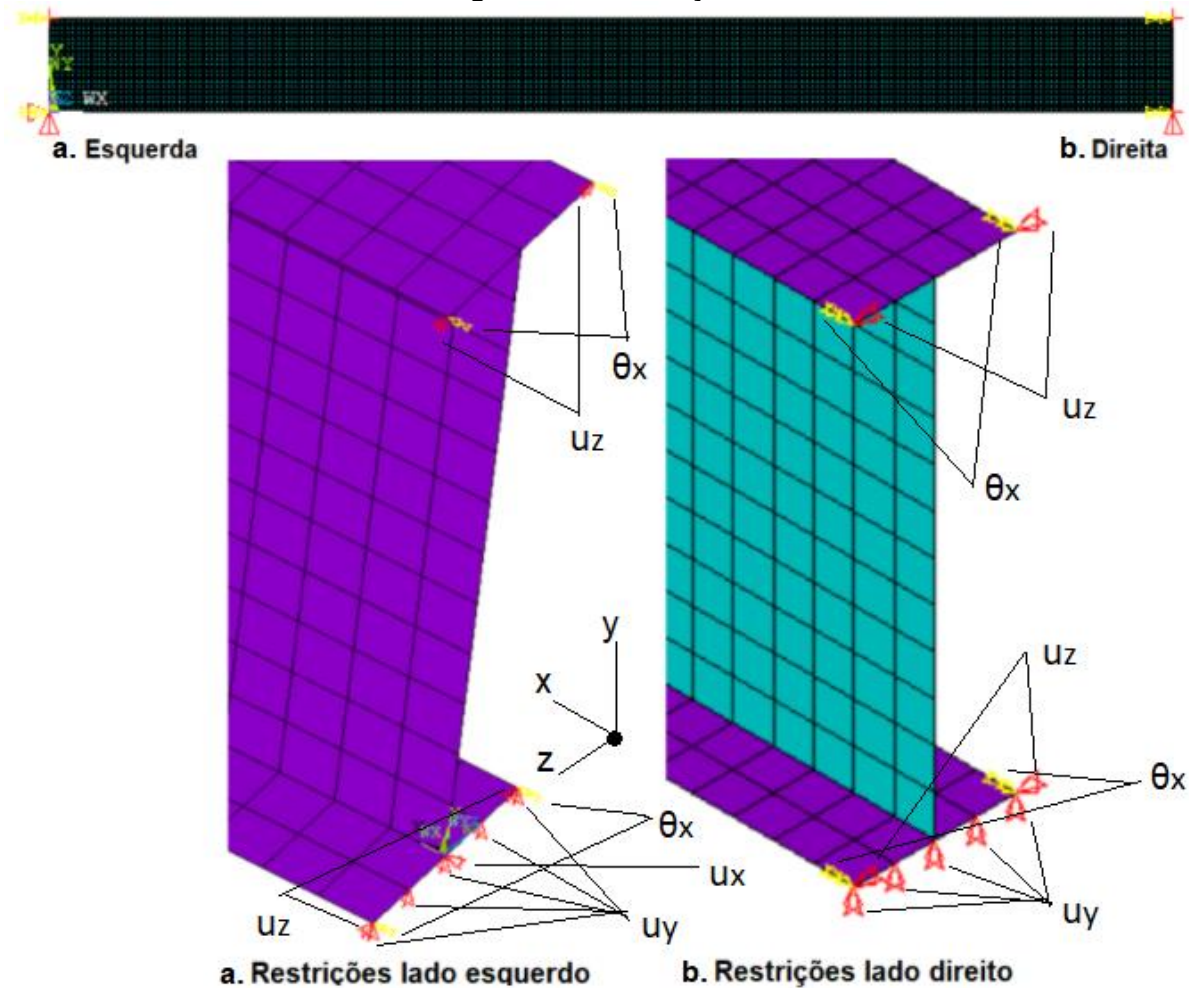
Fonte: Adaptada do ANSYS, 2021.

3.2.4.2 Apoios

Foi considerado no modelo numérico, assim como é disposto pela norma, vínculos de garfo nas duas extremidades, com intuito de simular com máxima semelhança de considerações e detalhes.

O vínculo de garfo consiste na torção (θ) em relação ao eixo longitudinal da viga, bem como o deslocamento em relação ao eixo perpendicular ao de flexão impedidos e o empenamento liberado (ROSSI, 2018). Com intuito de realizar tais restrições, os apoios restringiram em todos os nós nas extremidades da mesa inferior o deslocamento em y , enquanto nos nós de canto das mesas superior e inferior foram restringidos os deslocamentos em z além da rotação em x . Na Figura 26 são representadas essas restrições. Os triângulos duplos na cor amarela simbolizam o impedimento à torção, já os triângulos vermelhos retratam o impedimento à translação (Figura 26 – a; b). O deslocamento em relação ao eixo x foi restringido em um nó, localizado no centro da seção da mesa inferior, do lado esquerdo da viga (Figura 26 - a).

Figura 26 - Restrições



Fonte: Adaptada do ANSYS, 2021.

3.3 Refinamento da Malha

O refinamento da malha consiste em subdividir o problema em porções cada vez menores, com intuito de produzir resultados mais realistas. Como consequência o número de nós e elementos contidos, bem como a quantidade de equações a serem resolvidas aumentam consideravelmente. Tal fato reflete em processamentos mais demorados, com custo computacional mais oneroso (seja pelo tempo gasto ou pelos processadores demandados). É importante, portanto, que esse processo seja pensado de forma que equilibre a precisão requerida com o custo computacional.

Além disso, a versão estudantil do *software* ANSYS disponibilizada possui limitação de cálculo da malha até trinta e dois mil (32.000) nós.

No procedimento para refinar a malha foi proposto um modelo de viga padrão onde variou-se apenas o número de subdivisões da mesa por valores inteiros estipulados (n) múltiplos de 2, com no máximo 20 divisões. Vale ressaltar que com o

aumento do comprimento destravado (L_b) das vigas, aumenta-se também o número de nós e com isso, a limitação dos testes devido ao uso da versão estudantil tornou-se determinante. Uma solução encontrada para as vigas que não rodaram no programa foi encontrar pessoas ou instituições que possuíssem a versão profissional ou completa. Com auxílio da orientadora, professora e mestre Carla Cristiane Silva, alguns *scripts* foram submetidos aos computadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Buscou-se acima de tudo, tempo de processamento reduzido com precisão aceitável. A viga padrão é mostrada na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Viga padrão para refinamento da malha.

Viga	L_b (cm)	d (cm)	h_w (cm)	h_o (cm)	b_f (cm)	t_f (cm)	t_w (cm)
Padrão	1000	60	56,80	58,40	20	1,60	1,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos testes de refinamento para escolha da malha, executado de maneira precedente aos ensaios propostos no trabalho. Foram demonstrados apenas resultados a partir de 2 divisões da mesa.

Tabela 3 - Tempo x Razão entre malhas.

Divisões na mesa	n	M_{cr} (kN.m)	t (s)	$(b/n)_{n+1}/(b/n)_n$
2	1	204,19	5	-
4	2	232,62	5	1,139
6	3	237,13	8	1,019
8	4	238,40	18	1,005
10	5	238,83	38	1,002
12	6	238,98	55	1,001
14	7	238,98	69	1,000
16	8	238,95	124	0,999
20	9	Não encontrado	de 5596	-

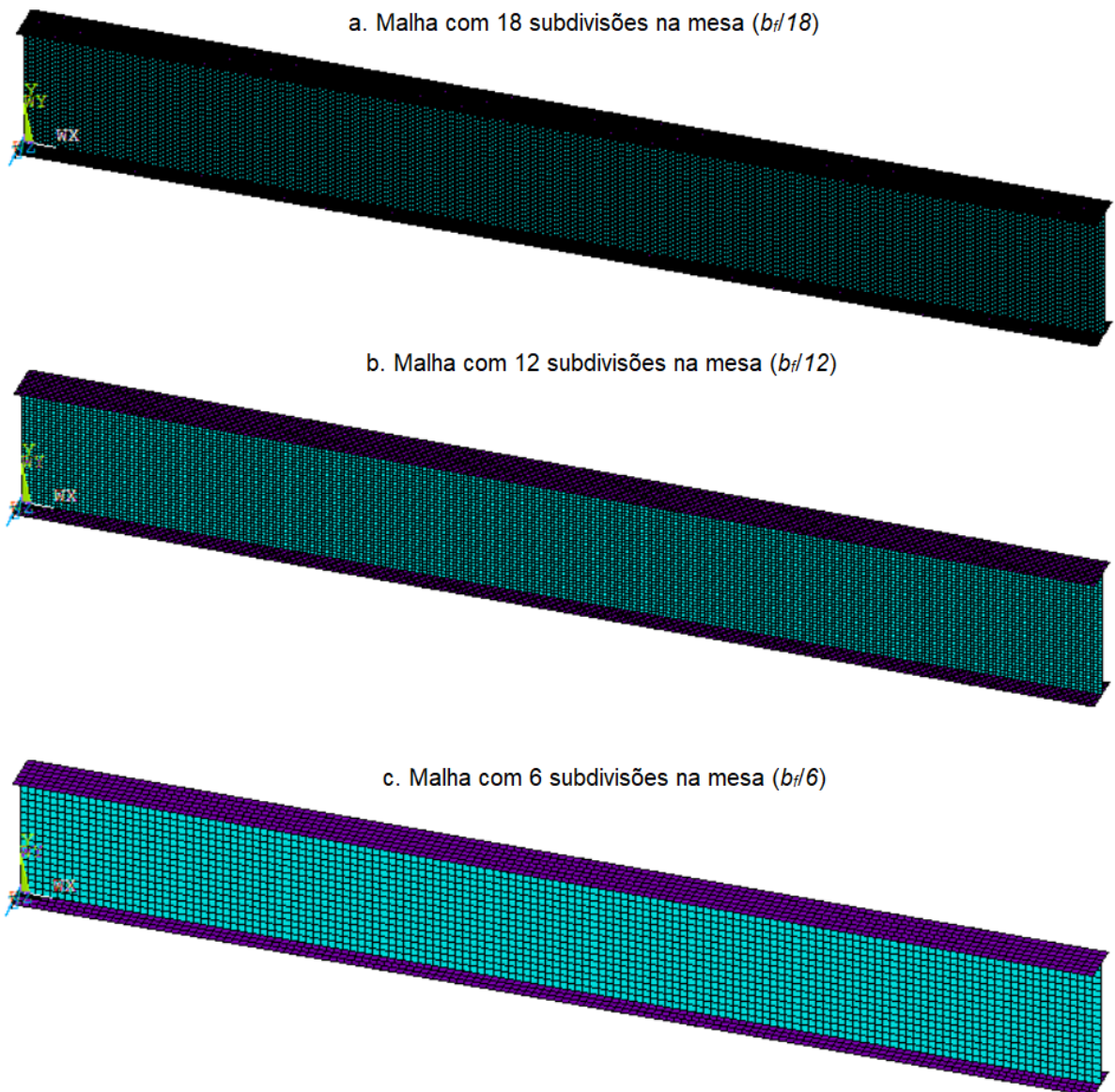
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Foi possível notar que a maioria das malhas propostas não obtiveram resultado com mais de 1% (um por cento) de diferença em relação ao anterior. Dessa forma, por ter tempo de análise relativamente pequeno, aliado a um pequeno desvio alcançado, optou-se pelo uso da malha referente a viga com 6 divisões na mesa, em suma $b/6$. Isso porque 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.

De forma a tornar visual a comparação entre a densidade das malhas, retirou-se do *software* a Figura 27 abaixo, que retrata as vigas com 18, 12 e 6 subdivisões na mesa.

Figura 27 - Densidade das malhas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.4 Validação do Modelo Numérico

Validação é a determinação de que o modelo é uma representação confiável do sistema real. A validação é geralmente conseguida através da calibração do

modelo que consiste em um processo iterativo de comparação entre similaridades do modelo e o comportamento real do sistema e/ou estudos relevantes com simulações semelhantes (GAVIRA, 2003).

Foi usado as “Planilhas Google” com intuito de elaborar uma planilha eletrônica responsável por calcular o momento crítico em todas as variações do modelo proposto. Considerou-se a aplicação de fórmulas proposta pela ABNT NBR 8800 (2008) como correta. Com intuito de validar o modelo numérico, utilizou-se essa planilha e a dissertação de Bezerra (2011) em que há cálculo de momento crítico elástico para vigas de perfil I duplamente simétricas com momento nas extremidades e com carga uniformemente distribuída. É importante ressaltar que o mesmo fez uso do *software ABAQUS* que também trabalha com a metodologia de elementos finitos.

Foram aplicados os mesmos parâmetros propostos pelo autor tanto no modelo analítico, quanto no numérico. Os resultados, bem como os parâmetros do perfil proposto podem ser visualizados na Tabela 4, em que C_b igual a 1 e 1,14 representa momento aplicado nas pontas e carga uniformemente distribuída respectivamente.

Tabela 4 - Validação modelo com $C_B = 1$ e 1,14.

Perfil	d (cm)	b_f (cm)	t_f (cm)	t_w (cm)	L_b (cm)
W310 x 28,3 (1)	30,90	10,20	0,89	0,60	500
W510 x 74,0 (2)	52,90	16,60	1,36	0,97	1000

$C_b = 1$					
Perfil	$M_{cr,ana} P$	$M_{cr,num} P$	$M_{cr,num} B$	$(M_{cr,ana}/ M_{cr,num})P$	$M_{cr,num} P/ M_{cr,num} B$
(1)	31,8	31,36	31,28	1,014	1,003
(2)	98,07	96,93	96,84	1,012	1,001

$C_b = 1,14$					
Perfil	$M_{cr,ana} P$	$M_{cr,num} P$	$M_{cr,num} B$	$(M_{cr,ana}/ M_{cr,num})P$	$M_{cr,num} P/ M_{cr,num} B$
(1)	36,26	35,55	36,37	1,020	0,977
(2)	111,81	110,00	108,98	1,016	1,009

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

As indicações referentes a letra P, retratam os resultados pessoais obtidos pelo autor do presente trabalho, enquanto as indicações para a letra B são os resultados obtidos por Bezerra.

A maior discrepância para modelos numéricos foi no perfil W310 x 28,3 para carga distribuída e chegou a 2,3%. De maneira complementar, pode-se realizar a análise entre o modelo analítico ($M_{cr,ana} P$) e numérico ($M_{cr,num} P$) em que a maior

diferença fica na ordem de 2%. Dessa forma, a proximidade entre os resultados apresentados fez com que o modelo fosse validado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados analíticos, obtidos através da planilha contida no Anexo D, contendo o método normativo, foram comparados com resultados numéricos, obtidos pelo *software ANSYS*, por meio de tabelas e gráficos, que foram exibidos abaixo. É importante salientar que os resultados analíticos não levam em consideração a distorção da alma, dessa forma a alma do perfil permanece rígida após a deformação da viga. Em contrapartida, o método dos elementos finitos utilizado pelo programa considera inteiramente esse fenômeno, assim como acontece em casos reais.

Os resultados para cada posição de carga são descritos nos próximos subitens.

4.1 Influência da Esbeltez da Alma e do Comprimento Destravado

4.1.1 Carga aplicada na semialtura da alma

Na Tabela 5 encontram-se os resultados numéricos dos modelos 1 a 28, de acordo com as condições de carregamento na semialtura (metade da altura do perfil) da alma e outras condições descritas anteriormente.

Tabela 5 - Momento crítico numérico e analítico com carga na semialtura.

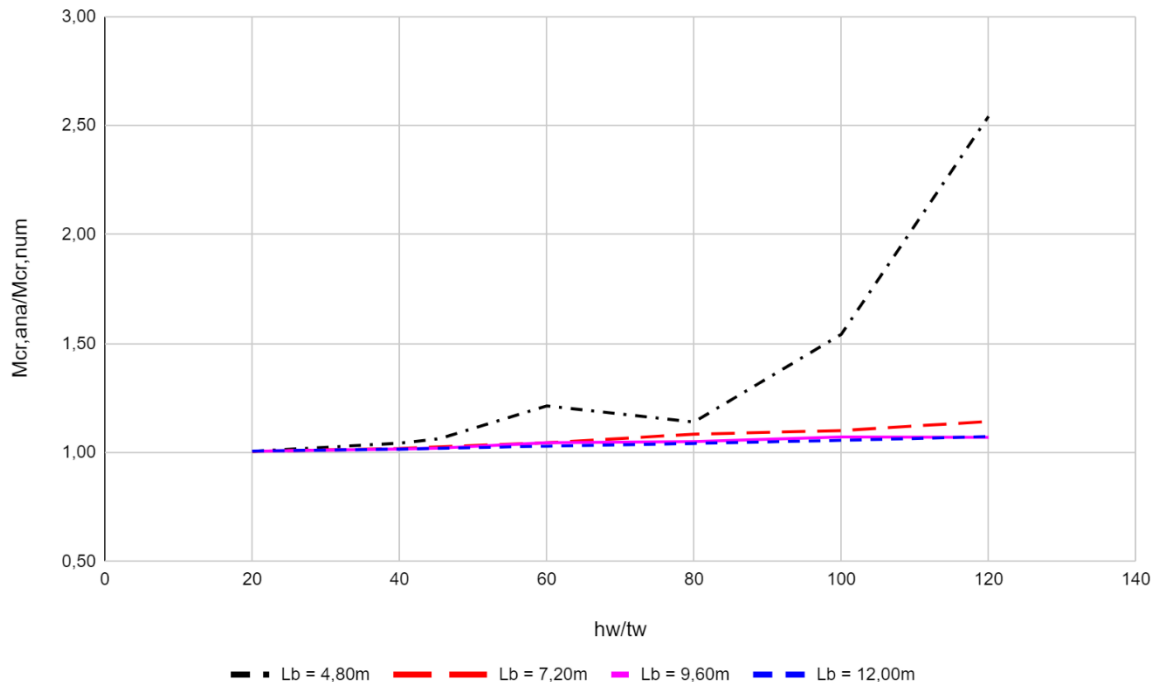
Modelo	L_b (cm)	t_w (cm)	h_d/L_b	h_w/t_w	$M_{cr,num}$ (kN.m)	$M_{cr,ana}$ (kN.m)	$M_{cr,ana}/M_{cr,num}$
SEM-1	480	2,840	1/8	20	1153,65	1160,61	1,006
SEM-2	480	1,420	1/8	40	726,53	758,38	1,044
SEM-3	480	1,250	1/8	45,44	691,47	735,92	1,064
SEM-4	480	0,947	1/8	60	582,81	707,84	1,215
SEM-5	480	0,710	1/8	80	609,38	695,05	1,141
SEM-6	480	0,568	1/8	100	447,54	690,44	1,543
SEM-7	480	0,473	1/8	120	270,79	688,40	2,542
SEM-8	720	2,840	1/12	20	701,39	705,52	1,006
SEM-9	720	1,420	1/12	40	396,19	403,80	1,019
SEM-10	720	1,250	1/12	45,44	375,74	385,87	1,027
SEM-11	720	0,947	1/12	60	346,15	361,86	1,045
SEM-12	720	0,710	1/12	80	323,49	350,95	1,085
SEM-13	720	0,568	1/12	100	315,01	346,99	1,102
SEM-14	720	0,473	1/12	120	301,98	345,22	1,143
SEM-15	960	2,840	1/16	20	506,61	510,02	1,007
SEM-16	960	1,420	1/16	40	266,71	271,10	1,016

SEM-17	960	1,250	1/16	45,44	250,48	255,71	1,021
SEM-18	960	0,947	1/16	60	228,25	238,78	1,046
SEM-19	960	0,710	1/16	80	215,46	226,40	1,051
SEM-20	960	0,568	1/16	100	207,70	222,67	1,072
SEM-21	960	0,473	1/16	120	206,84	221,44	1,071
SEM-22	1200	2,840	1/20	20	397,77	400,73	1,007
SEM-23	1200	1,420	1/20	40	200,79	204,05	1,016
SEM-24	1200	1,250	1/20	45,44	187,20	190,98	1,020
SEM-25	1200	0,947	1/20	60	168,81	173,86	1,030
SEM-26	1200	0,710	1/20	80	158,96	165,73	1,043
SEM-27	1200	0,568	1/20	100	154,03	162,74	1,057
SEM-28	1200	0,473	1/20	120	150,28	161,40	1,074

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Foi elaborado o Gráfico 1 para representar graficamente a relação $M_{cr,ana}/M_{cr,num}$ da Tabela 5. Nele, as diferenças ocasionadas pela variação do comprimento destravado e da esbeltez da alma, devido a flambagem lateral com torção em vigas metálicas com perfil I duplamente simétrico, tornam-se ainda mais nítidas.

Gráfico 1 - Razão $M_{cr,ana}/M_{cr,num}$ em função do vão (L_b) e da esbeltez da alma (h_w/t_w).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A relação proposta no Gráfico 1 mostra comportamento semelhante para todos os comprimentos destravados. À medida que se aumenta a esbelteza da alma, a discrepância entre os resultados numéricos e analíticos teve como tendência aumentar.

É possível observar que as maiores diferenças, entre os momentos críticos analíticos e numéricos, se deram para os menores comprimentos destravados. Tal fato aponta que, para pequenos comprimentos destravados, aliados a almas mais esbeltas, a influência da distorção da alma é maior. Concomitante a isso, tem-se que a metodologia de cálculo proposta pela ABNT NBR 8800 (2008) produz valores superestimados de momento crítico elástico para esses casos. É em alguns casos, portanto, contrária à segurança, uma vez que seus resultados de momento crítico elástico (resistência) são maiores que os reais para atingir o estado-limite último da FLT.

Nota-se pelo gráfico, que para L_b de 4,80 m (relação entre $h_d/L_b=1/8$), a diferença entre o momento crítico analítico e numérico aumenta de forma expressiva a partir da esbelteza (h_w/t_w) de 60, sendo de aproximadamente 21,50% nesse caso. Já para valores mais elevados de esbelteza da alma, como de 120, o resultado numérico chega a ser aproximadamente 154% inferior em relação ao analítico.

Na análise numérica, para vigas com pequeno comprimento destravado e esbelteza alta, o modo de FLT, em geral, não foi o primeiro modo de flambagem encontrado. Ou seja, a medida em que se aumenta o carregamento a viga irá falhar por outro modo de flambagem, e à medida que a carga aumenta pode ocorrer a FLT. Devido a esse fato, a FLT pode não ocorrer para a carga mínima, o que gerou uma curva que não tem um crescimento para todas esbeltezes, referente ao comprimento de viga de 4,80 m.

Os resultados da curva referente ao comprimento destravado (L_b) de 4,80 m e esbelteza da alma (h_w/t_w) igual a 80 apresenta comportamento anômalo possivelmente em virtude do apresentado no parágrafo anterior.

É possível analisar também que para o comprimento destravado de 7,20 m (relação entre $h_d/L_b=1/12$), tem-se notável diferença entre os momentos críticos analíticos e numéricos a partir da esbelteza da alma de 80, em que o *software* é inferior em 8,50%, e chega a cerca de 14,30% para esbelteza de 120.

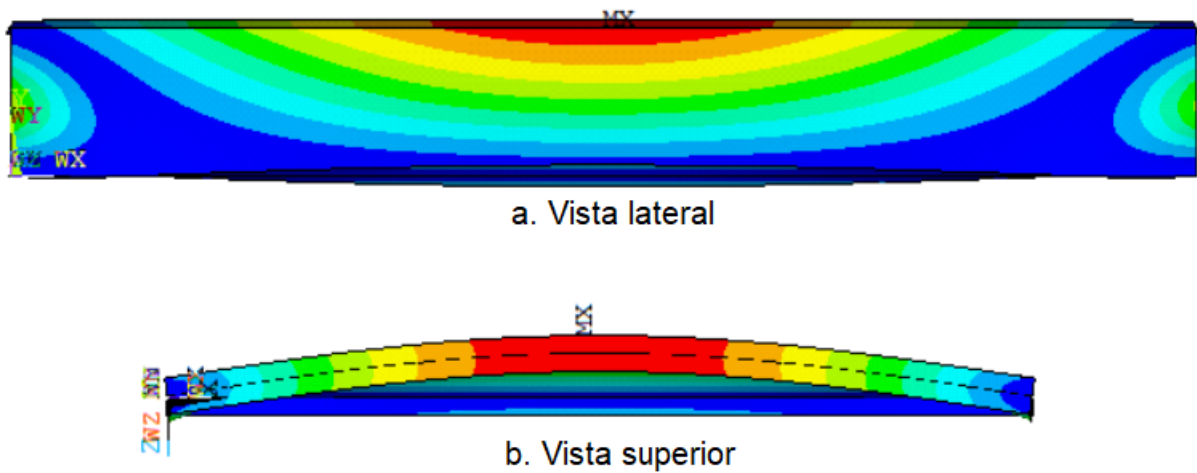
Para L_b de 9,60 m ($h_d/L_b=1/16$) a diferença não parece ser tão acentuada graficamente, devido principalmente ao comportamento gráfico mais expressivo

gerado pelas vigas anteriores. Contudo, tem-se que a inferioridade dos resultados numéricos, demonstrada na relação $M_{cr,ana}/M_{cr,num}$, chega a 4,60% (para esbeltez da alma de 60) e 7,10% para a maior esbeltez testada (120). Enquanto isso, o comprimento destravado de 12,00 m (relação entre $h_0/L_b=1/20$) apontou, para $h_w/t_w=60$, resultado numérico inferior em 3,00%, chegando a cerca de 7,40% para a maior esbeltez (120).

Vale ressaltar que na maioria das vezes as vigas de aço usuais nos projetos possuem razão entre a altura da seção transversal (d) e o vão (Comprimento destravado entre dois apoios - L_b), d/L_b , inferior a 1/15 (SILVA, 2017). As curvas que representam essa faixa são as correspondentes às vigas de 9,60 m (1/16) e 12,00 m (1/20). Apesar da importância do estudo referente as vigas acima dessa faixa, 4,80 m (1/8) e 7,20 m (1/12), elas representam condições ainda de pouca utilização prática para a condição do vão ser igual ao comprimento destravado. Um dos possíveis motivos para não ser tão comum o uso de perfis menores, é o fato de o mercado brasileiro de residências unifamiliares, onde os vãos são relativamente menores, utilizar em menor escala perfis metálicos.

Na Figura 28 é retratado o comportamento do Modelo SEM-4 frente a análise de flambagem proposta. Nela é possível verificar a ocorrência da flambagem lateral com torção com distorção da alma, em vigas I duplamente simétricas e vínculo de garfo, submetida a carga uniformemente distribuída na semialtura da seção transversal com comprimento destravado de 4,80 m e esbeltez da alma de 60. É possível identificar na imagem duas perspectivas que foram usadas com intuito de facilitar o entendimento.

Figura 28 - Comportamento da viga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.1.2 Carga aplicada na mesa inferior (Estabilizante)

Para as cargas aplicadas na mesa inferior, os dados foram expostos na Tabela 6. Vale ressaltar que o momento crítico analítico é baseado em cargas aplicadas na semialtura, tanto para a análise do subitem 4.1.2, quanto 4.1.3.

Tabela 6 - Momento crítico numérico e analítico com carga na mesa inferior.

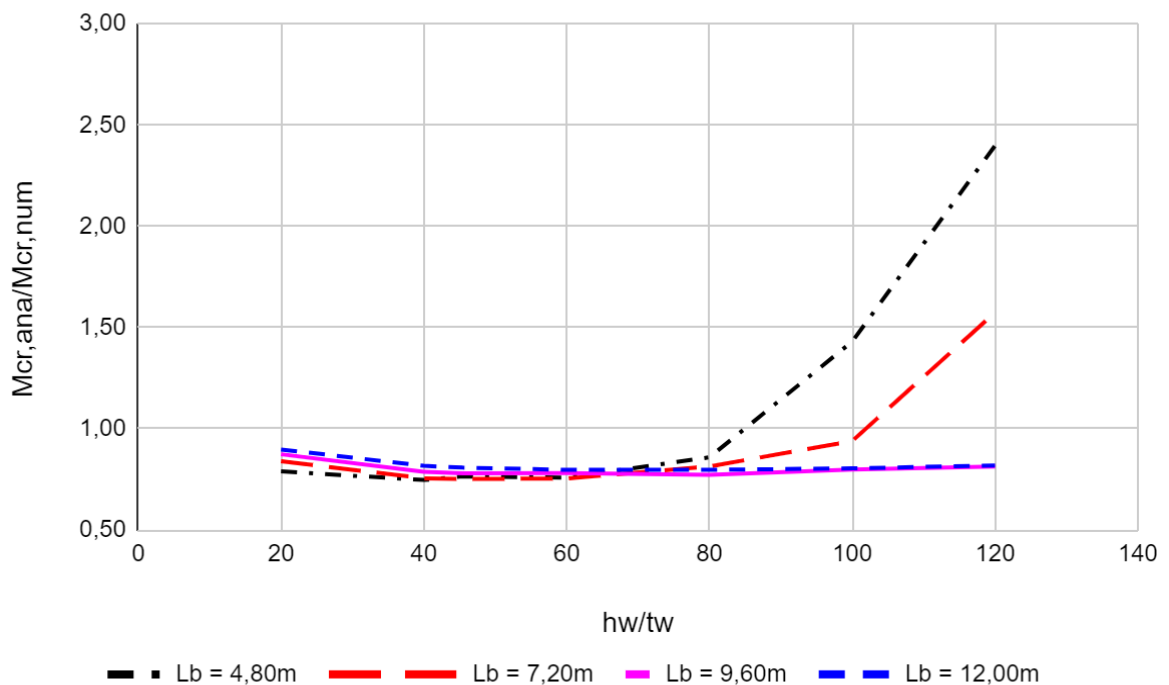
Modelo	L_b (cm)	t_w (cm)	h_d/L_b	h_w/t_w	$M_{cr,num}$ (kN.m)	$M_{cr,ana}$ (kN.m)	$M_{cr,ana}/M_{cr,num}$
INF-29	480	2,840	1/8	20	1469,39	1160,61	0,790
INF-30	480	1,420	1/8	40	1014,94	758,38	0,747
INF-31	480	1,250	1/8	45,44	962,05	735,92	0,765
INF-32	480	0,947	1/8	60	933,03	707,84	0,759
INF-33	480	0,710	1/8	80	808,96	695,05	0,859
INF-34	480	0,568	1/8	100	482,67	690,44	1,430
INF-35	480	0,473	1/8	120	287,14	688,40	2,397
INF-36	720	2,840	1/12	20	839,92	705,52	0,840
INF-37	720	1,420	1/12	40	534,30	403,80	0,756
INF-38	720	1,250	1/12	45,44	513,13	385,87	0,752
INF-39	720	0,947	1/12	60	479,51	361,86	0,755
INF-40	720	0,710	1/12	80	431,25	350,95	0,814
INF-41	720	0,568	1/12	100	369,30	346,99	0,940
INF-42	720	0,473	1/12	120	219,30	345,22	1,574
INF-43	960	2,840	1/16	20	583,28	510,02	0,874
INF-44	960	1,420	1/16	40	344,04	271,10	0,788
INF-45	960	1,250	1/16	45,44	327,95	255,71	0,780
INF-46	960	0,947	1/16	60	305,38	238,78	0,782

INF-47	960	0,710	1/16	80	293,16	226,40	0,772
INF-48	960	0,568	1/16	100	278,81	222,67	0,799
INF-49	960	0,473	1/16	120	271,87	221,44	0,814
INF-50	1200	2,840	1/20	20	446,25	400,73	0,898
INF-51	1200	1,420	1/20	40	249,66	204,05	0,817
INF-52	1200	1,250	1/20	45,44	236,26	190,98	0,808
INF-53	1200	0,947	1/20	60	218,02	173,86	0,797
INF-54	1200	0,710	1/20	80	207,84	165,73	0,797
INF-55	1200	0,568	1/20	100	202,20	162,74	0,805
INF-56	1200	0,473	1/20	120	197,03	161,40	0,819

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O Gráfico 2 traz a relação descrita na Tabela 6.

Gráfico 2 - Razão $M_{cr,ana}/M_{cr,num}$ em função do vão (L_b) e da esbeltez da alma (h_w/t_w).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A relação entre o momento crítico analítico e o numérico revela que, para cargas aplicadas na mesa inferior, uma parte dos valores normativos estão acima do que ocorre realmente, enquanto a maior parcela se encontra abaixo do encontrado com auxílio do *software*. Ao se tratar de valores de resistência, a norma deve trazer valores preferencialmente menores ou aproximados aos reais, com intuito principal de fazer valer a segurança e o custo/benefício do usuário e das construções.

Para o comprimento destravado de 12,00 m (relação entre $h_d/L_b=1/20$), todos os valores normativos se encontram abaixo dos obtidos pelo *software*, com inferioridade variando entre 10,20% (Modelo INF-50) e de aproximadamente 20,30% (Modelo INF-53) dentre os modelos testados com esse L_b .

Para os modelos com o comprimento destravado de 9,60 m todos os valores normativos também foram inferiores aos obtidos pelo *software ANSYS*. Considerando o Modelo INF-47 (relação entre $h_d/L_b=1/16$), o resultado analítico apresentou inferioridade de 22,80%.

Nos perfis com menor L_b a esbeltez da alma se mostra determinante. Para o vão de 7,20 m (relação entre $h_d/L_b=1/12$) com h_w/t_w entre 20 e 100, os resultados normativos mostraram-se inferiores, com máxima próxima de 25,00% (Modelo INF-38), enquanto para esbeltez de 120, o valor de momento crítico elástico obtido pela norma superou o encontrado pelo *software* em 57,40%.

Já para o vão de 4,80 m (relação entre $h_d/L_b=1/8$), os valores analíticos foram inferiores até a esbeltez de 80, com máxima de aproximadamente 25,00% (Modelo INF-30). A partir de então, com o aumento da esbeltez os valores numéricos passaram a ter inferioridade significativa que chegaram a 140,00% (Modelo INF-35). Um dos possíveis motivos para esse comportamento é a grande esbeltez da alma combinado a um comprimento destravado relativamente baixo. Essa união de fatores pode ser determinante para que a alma distorça com mais intensidade, diminuindo assim o momento crítico elástico obtido pelo *software*.

4.1.3 Carga aplicada na mesa superior (Desestabilizante)

Assim como o item 4.1.2 referente a cargas aplicadas na mesa inferior, realizou-se testes com a carga aplicada na mesa superior. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7, abaixo.

Tabela 7 - Momento crítico numérico e analítico com carga na mesa superior

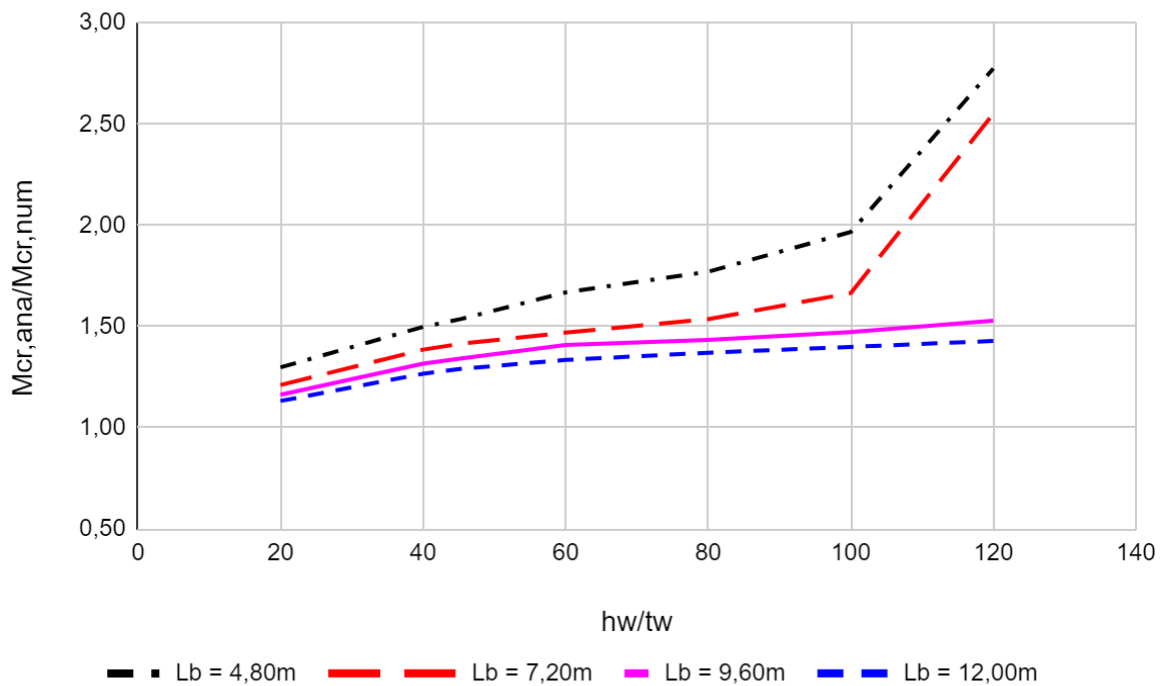
Modelo	L_b (cm)	t_w (cm)	h_d/L_b	h_w/t_w	$M_{cr,num}$ (kN.m)	$M_{cr,ana}$ (kN.m)	$M_{cr,ana}/M_{cr,num}$
SUP-57	480	2,840	1/8	20	893,83	1160,61	1,298
SUP-58	480	1,420	1/8	40	506,23	758,38	1,498
SUP-59	480	1,250	1/8	45,44	478,48	735,92	1,538
SUP-60	480	0,947	1/8	60	424,24	707,84	1,668
SUP-61	480	0,710	1/8	80	392,63	695,05	1,770
SUP-62	480	0,568	1/8	100	351,10	690,44	1,967

SUP-63	480	0,473	1/8	120	248,19	688,40	2,774
SUP-64	720	2,840	1/12	20	582,44	705,52	1,211
SUP-65	720	1,420	1/12	40	291,39	403,80	1,386
SUP-66	720	1,250	1/12	45,44	272,56	385,87	1,416
SUP-67	720	0,947	1/12	60	246,17	361,86	1,470
SUP-68	720	0,710	1/12	80	228,44	350,95	1,536
SUP-69	720	0,568	1/12	100	208,42	346,99	1,665
SUP-70	720	0,473	1/12	120	135,41	345,22	2,549
SUP-71	9,60	2,840	1/16	20	438,61	510,02	1,163
SUP-72	9,60	1,420	1/16	40	205,89	271,10	1,317
SUP-73	9,60	1,250	1/16	45,44	190,42	255,71	1,343
SUP-74	9,60	0,947	1/16	60	169,51	238,78	1,409
SUP-75	960	0,710	1/16	80	157,83	226,40	1,434
SUP-76	960	0,568	1/16	100	151,19	222,67	1,473
SUP-77	960	0,473	1/16	120	144,91	221,44	1,528
SUP-78	1200	2,840	1/20	20	353,83	400,73	1,133
SUP-79	1200	1,420	1/20	40	161,05	204,05	1,267
SUP-80	1200	1,250	1/20	45,44	147,90	190,98	1,291
SUP-81	1200	0,947	1/20	60	130,23	173,86	1,335
SUP-82	1200	0,710	1/20	80	120,90	165,73	1,371
SUP-83	1200	0,568	1/20	100	116,33	162,74	1,399
SUP-84	1200	0,473	1/20	120	112,94	161,40	1,429

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O Gráfico 3, a seguir, traz os resultados da Tabela 7.

Gráfico 3 - Razão $M_{cr,ana}/M_{cr,num}$ em função do vão (L_b) e da esbeltez da alma (h_w/t_w)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Observa-se pelos resultados obtidos pela relação $M_{cr,ana}/M_{cr,num}$ na Tabela 7 e no Gráfico 3, que para carga aplicada na mesa superior, todos os valores propostos pela norma são superestimados. As diferenças são expressivas até mesmo para os comprimentos maiores. Tal relação enfatiza um grande problema, já que os resultados analíticos estão contra a segurança das estruturas e conseqüentemente dos usuários.

É possível analisar, através do gráfico, grande influência da esbeltez da alma. Isso porque em todos os vãos estudados a relação do momento crítico elástico analítico com o numérico, aumenta à medida em que cresce a esbeltez da alma. Para o menor vão (4,80 m - relação entre $h_o/L_b=1/8$), o valor obtido pela normativa foi 177% maior que o numérico na maior esbeltez (Modelo SUP-63). Enquanto para o maior comprimento destravado (12,00 m - relação entre $h_o/L_b=1/20$), aliado a esbeltez de 120, o resultado normativo superou em cerca de 43,00% o *software*.

Tem-se ainda que para as menores esbeltezes estudadas ($h_w/t_w=20$), com o carregamento desestabilizante, a diferença foi expressiva em todos os casos, e teve como unanimidade valores analíticos superiores aos numéricos. O menor vão (4,80 m - relação entre $h_o/L_b=1/8$) contou com uma diferença aproximada de 30,00% (Modelo SUP-57), para 7,20 m (relação entre $h_o/L_b=1/12$) a diferença foi de 21,00% (Modelo SUP-64), já L_b igual a 9,60 m (relação entre $h_o/L_b=1/16$) obteve resultados numéricos

16% menores que os analíticos (Modelo SUP-71), enquanto o maior vão (12,00 m - relação entre $h_d/L_b=1/20$) 13% (Modelo SUP-78).

4.1.4 Resumo de resultados

A Tabela 8 foi desenvolvida com intuito de resumir os resultados detalhados anteriormente, facilitando assim a visualização e comparação dos dados demonstrados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 8 - Tabela resumo de resultados

Comprimento destravado	Aplicação de carga	Esbeltezes						
		20,00	40,00	45,44	60,00	80,00	100,00	120,00
		$M_{cr,ana}/M_{cr,num}$						
4,80	Semialtura	1,006	1,044	1,064	1,215	1,141	1,543	2,542
	Inferior	0,790	0,747	0,765	0,759	0,859	1,430	2,397
	Superior	1,298	1,498	1,538	1,668	1,770	1,967	2,774
7,20	Semialtura	1,006	1,019	1,027	1,045	1,085	1,102	1,143
	Inferior	0,840	0,756	0,752	0,755	0,814	0,940	1,574
	Superior	1,211	1,386	1,416	1,470	1,536	1,665	2,549
9,60	Semialtura	1,007	1,016	1,021	1,046	1,051	1,072	1,071
	Inferior	0,874	0,788	0,780	0,782	0,772	0,799	0,814
	Superior	1,163	1,317	1,343	1,409	1,434	1,473	1,528
12,00	Semialtura	1,007	1,016	1,020	1,030	1,043	1,057	1,074
	Inferior	0,898	0,817	0,808	0,797	0,797	0,805	0,819
	Superior	1,133	1,267	1,291	1,335	1,371	1,399	1,429

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

4.2 Considerações

Por intermédio dos resultados obtidos na presente pesquisa, pode-se observar que a distorção da alma, quando ocorre no fenômeno da flambagem lateral com torção, diminui o momento crítico elástico nas vigas de perfil I duplamente simétricas submetidas a carga uniformemente distribuída em todo comprimento destravado, à medida em que se aumenta a esbeltez da alma (levando em consideração o exposto neste trabalho) e diminui-se o comprimento destravado.

Na aplicação usual das cargas, foi possível constatar que a carga desestabilizante (na mesa superior) faz com que os resultados numéricos fiquem predominantemente menores em relação aos analíticos. Enquanto para as cargas estabilizantes (na mesa inferior), os valores numéricos foram, em grande parte, superiores aos propostos pela norma. De acordo com Rossi (2021), essa situação

ocorre devido a ABNT NBR 8800 (2008) não considerar em seus procedimentos posições alternativas de carregamento.

Por fim, com intuito de que os resultados obtidos pela norma sejam cada vez mais fidedignos ao comportamento real, deve-se cogitar a possibilidade de análise dos métodos propostos pela ABNT NBR 8800 (2008). Nota-se a necessidade de adequações às formulações de momento crítico elástico propostas pela mesma, com relação ao efeito distorcional mencionado e também em relação ao posicionamento das cargas. Visto que construções com elementos metálicos ganham espaço a cada dia e com isso, se faz necessário que os métodos sejam progressivamente mais seguros e econômicos.

Uma importante observação deve ser feita a respeito de um efeito localizado neste trabalho. Durante os testes numéricos, em alguns modelos, em especial modelos com menor comprimento destravado (L_b) e maior esbeltez, manifestou-se também, certa distorção nos apoios. Tal fato pode ter ocorrido como consequência do esforço cortante proveniente da carga uniformemente distribuída. É comum, em análises numéricas, inserir enrijecedores para evitar esses efeitos localizados.

Vale ressaltar também, a importância dos testes computacionais, uma vez que a presente pesquisa foi realizada por meio de um computador, onde demandou-se tempo experimental relativamente pequeno, com gastos econômicos limitados a poucos fatores (energia elétrica e tempo). Os resultados aqui obtidos são expressivos e obtidos por um custo relativamente baixo. São inúmeras as possibilidades e nos casos em que não houver real necessidade de testes físicos experimentais, deve ser considerado, para futuras pesquisas, os métodos experimentais computacionais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O objeto de estudo deste trabalho foi desenvolver uma análise comparativa do momento crítico elástico de FLT entre o resultado obtido pela ABNT NBR 8800 (2008) em contraste com o *software ANSYS Mechanical*. Foi utilizado perfil I duplamente simétrico, carga distribuída uniformemente ao longo do comprimento destravado aplicada na semialtura, na mesa superior e na mesa inferior, e vínculos de garfo (torção livre e empenamento impedido).

A comparação entre os dois métodos propostos permitiu estudar o efeito da distorção da alma, bem como da mudança no local de aplicação das cargas por meio dos resultados numéricos.

Para alcançar o objeto de estudo proposto e embasar a pesquisa, foram abordadas informações relevantes a respeito do aço, da flambagem lateral com torção e fatores que influenciam a mesma, do método analítico proposto pela ABNT NBR 8800 (2008), sobre o *software ANSYS Mechanical* e o Método dos Elementos Finitos.

Foi possível estudar, através dos dados e gráficos obtidos pelos experimentos, as curvas de influência da distorção da alma em função da esbeltez da alma e do comprimento destravado.

Notou-se que há discrepância considerável entre os resultados analíticos e numéricos ao diminuir o comprimento destravado das vigas metálicas, assim como quando foi diminuída a espessura da alma (por consequência, a esbeltez da mesma) mantendo-se os demais parâmetros constantes. Para cargas aplicadas na semialtura e na mesa superior, os resultados numéricos foram, invariavelmente, menores que os analíticos.

Já para cargas aplicadas na mesa inferior, os valores de momento crítico elástico numéricos transitaram entre maiores e menores que os analíticos. Para pequenos comprimentos destravados e elevada esbeltez da alma, os resultados normativos mantiveram-se superestimados. Contudo, com o aumento do vão e diminuição da esbeltez da alma, os valores normativos mostraram-se, em grande parte, menores que os numéricos, portanto, mais conservadores e com isso, a favor da segurança.

Logo, conclui-se que possivelmente os resultados obtidos pelos métodos normativos não preveem de forma adequada o momento crítico elástico para o fenômeno de flambagem lateral com torção. Dentre os motivos estão a não consideração da distorção da alma, além da não consideração de aplicação de cargas em local alternativo à semialtura.

Vale ressaltar, por fim, que a obtenção do momento crítico elástico é de grande importância para determinar o momento fletor resistente de cálculo no estado-limite último da flambagem lateral com torção, o que torna ainda mais valorosa a complementação do método de cálculo do momento crítico elástico proposto pela ABNT NBR 8800 (2008). Deve-se, então, aperfeiçoar e/ou buscar novos parâmetros de cálculo, embasados no que causa divergência significativa nos resultados, com intuito principal de garantir a segurança nas edificações.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a realização deste trabalho, verificou-se a possibilidade da realização de trabalhos futuros voltados para as seguintes temáticas:

- Elaborar e testar procedimentos que considerem diferentes condições de vinculação e carregamento, não propostos pela ABNT NBR 8800 (2008) atualmente;
- Realizar pesquisa semelhante a essa com cargas concentradas aplicadas;
- Fazer uso do *ANSYS* em análises comparativas com os cálculos propostos por outras normas, como por exemplo a ABNT NBR 6118 (2014) - *Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos*;
- Realizar pesquisa comparativa semelhante a essa, com uso de outros perfis abordados pelo Anexo G da ABNT NBR 8800 (2008);
- Realizar estudo elaborado a respeito da linguagem de programação *APDL*, utilizada pelo *ANSYS*, com intuito de facilitar a produção de *scripts* em trabalhos semelhantes a esse;
- Realizar estudos para verificar a influência de cortes na mesa e na alma na flambagem lateral com torção por meio de métodos normativos em comparação com o método dos elementos finitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, L. **Determinação de momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares**. 2010. Dissertação (Mestre em Estruturas) – Escola de Engenharia, Programa de pós graduação em engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- ABREU, J.F.A.C. **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, 2016.
- ARAÚJO, D.M. **Utilização do aço na construção civil: Estruturas Metálicas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac. Maceió, 2019.
- AYALA, I.C.A. **Customização do software ANSYS para análise de lajes de concreto protendido pelo método dos elementos finitos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2017.
- BANDEIRA, A.A.C. **Análise do uso de estruturas de aço em edificações habitacionais de interesse social**. 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2008.
- BENICÁ, M.E. **Simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço e concreto: modelo parametrizado de elementos finitos**. 2019. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.
- BEZERRA, E. **Determinação de momento fletor resistente à flambagem lateral com torção em vigas de aço casteladas**. 2011. Dissertação (Mestre em Estruturas) – Escola de Engenharia, Programa de pós graduação em engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Rio de Janeiro, 2011.
- BEZERRA, E; SILVA, A; FAKURY, R; *et al.* **Momento fletor resistente de vigas casteladas de aço à flambagem lateral com torção**. Revista da Estrutura do Aço, Centro Brasileiro de Construção em Aço, vol. 2, n.2, p. 95-114, agosto de 2013.
- BRANCHIER, H. **Contribuições dos softwares na aprendizagem de análise e cálculo de elementos estruturais**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari. Lajeado, 2017.
- CARVALHO, R. **Análise não linear de pavimentos de edifícios de concreto através da analogia de grelha**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994.
- CASTRO, B.G.S. **Utilização de estruturas metálicas em edificações residenciais unifamiliares**. 2005. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de

Engenharia, Programa de pós graduação em engenharia de estruturas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

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**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 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[...] UniCesumar, 2015. p. 4-8.

FURLAN JUNIOR, S.; CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. A utilização de programas computacionais da área de estruturas no ensino de engenharia civil. Em: XXVII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE 99. Natal, p. 1300-1307, 1999.

GAVIRA, M.O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade Federal de São Paulo: São Carlos, 2003.

PARREIRAS, A.O. **O aço e a construção civil no Brasil: Um estudo do sistema construtivo metálico**. 2001. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

SANTOS, R; VITO, M. **Estudo comparativo entre o dimensionamento de estruturas articuladas em aço para treliça em arco pela NBR 8800:2008, EUROCODE 3 e ANSI/AISC 360-05**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil. UNESC, Santa Catarina, 2016.

SCHLICHTING, W. L. **Relevância do uso de estruturas de aço em obras habitacionais populares**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, 2018.

SILVA, A. **Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento

de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

SILVA, A. **Um programa de elementos finitos em GPU e orientado a objetos para análise dinâmica não linear de estruturas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

SILVA, 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**. 2017. Dissertação (Mestre em Estruturas) – Escola de Engenharia, Programa de pós graduação em engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

SILVA, D. **Análise de impacto por elementos finitos sobre dispositivo estrutural de segurança veicular lateral**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília - Faculdade UnB Gama. Brasília, 2018.

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

Apêndice A – *Script* para processamento de modelos com carga na semialtura

```

! *****APRESENTAÇÃO*****!
! DE: Diego Moreira Machado, Carla Cristiane Silva e Marina Molinar Gonzales
!   SCRIPT   PARA   CÁLCULO   DE   MOMENTO   CRÍTICO
! PERFIL I METÁLICO COM VÍNCULOS DE GARFO E CARGA NA SEMI ALTURA
!UNIDADES           UTILIZADAS:           kN,           m
! ÚLTIMA REVISÃO: 01/07/2021
! NOTAS:
! - Itens precedidos '!' são comentários e não comandos
! - Não há diferença entre maiúsculo e minúsculo.
! -----!
! 1. INICIALIZAÇÃO DO ANSYS
! -----!
/CLEAR,START
/UIS,MSGPOP,4
/NERR,0,,,0
/BATCH
IMMED,0
! -----!
! 2. PARÂMETROS DE ENTRADA
! -----!
! Parâmetros referentes aos materiais
Ea = 200000000           ! [kN/m2] Módulo de elasticidade do aço
nu = 0.3                 ! [adm] Coeficiente de Poisson
! Parâmetros geométricos
LViga = 4.80            ! [m] Comprimento da viga
ho = 0.60               ! [m] Distância entre as faces da mesa
bfz = 0.20              ! [m] Largura da Mesa
tfy = 0.016             ! [m] Espessura da Mesa
twz = 0.0284           ! [m] Espessura da Alma
! Parâmetros referentes a condição de contorno
P = 1*LViga             ! [kN.m] Força atuante
! -----!
! 3. PRÉ-PROCESSAMENTO
! -----!
! Construção do modelo antes de fazer a solução
/PREP7
MODNAME = 'FLT01'
Lmodelo = LViga
! 3.1 Cria as áreas do modelo geométrico sólido
RECTNG,0,LViga,0,ho/2
RECTNG,0,LViga,ho/2,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
! 3.2 Adiciona um material da biblioteca

```

```

MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,Ea
MPDATA,PRXY,1,,nu
! 3.3 Adiciona um elemento da biblioteca
ET,1,181
! 3.4 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
! 3.5 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/14
! 3.6 Cria a malha e mescla itens coincidentes
WPCSYS,-1,0
ALLSEL,ALL
AMESH,ALL
ALLSEL
NUMMRG,ALL
NUMMRG,ALL
NUMMRG,ALL
! 3.7 Aplicação das cargas no modelo MEF
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,ho/2
*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT
FMNODE = P/NODECOUNT
F,ALL,FY,-FMNODE
! 3.8 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+0.0001
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 – *Script* para processamento de modelos com carga na mesa superior

! *****APRESENTAÇÃO*****!

! DE: Diego Moreira Machado, Carla Cristiane Silva e Marina Molinar Gonzales
 ! SCRIPT PARA CÁLCULO DE MOMENTO CRÍTICO
 ! PERFIL I METÁLICO COM VÍNCULOS DE GARFO E CARGA NA MESA SUPERIOR
 ! UNIDADES UTILIZADAS: kN, m
 ! ÚLTIMA REVISÃO: 01/07/2021
 ! NOTAS:
 ! - Itens precedidos '!' são comentários e não comandos
 ! - Não há diferença entre maiúsculo e minúsculo.
 ! -----!
 ! 1. INICIALIZAÇÃO DO ANSYS
 ! -----!
 /CLEAR,START
 /UIS,MSGPOP,4
 /NERR,0,,,0
 /BATCH
 IMMED,0
 ! -----!
 ! 2. PARÂMETROS DE ENTRADA
 ! -----!
 ! Parâmetros referentes aos materiais
 Ea = 200000000 ! [kN/m²] Módulo de elasticidade do aço
 nu = 0.3 ! [adm] Coeficiente de Poisson
 ! Parâmetros geométricos
 LViga = 4.80 ! [m] Comprimento da viga
 ho = 0.60 ! [m] Distância entre as faces da mesa
 bfz = 0.20 ! [m] Largura da Mesa
 tfy = 0.016 ! [m] Espessura da Mesa
 twz = 0.0284 ! [m] Espessura da Alma
 ! Parâmetros referentes a condição de contorno
 P = 1*LViga ! [kN.m] Força atuante
 ! -----!
 ! 3. PRÉ-PROCESSAMENTO
 ! -----!
 ! Construção do modelo antes de fazer a solução
 /PREP7
 MODNAME = 'FLT01'
 Lmodelo = LViga
 ! 3.1 Cria as áreas do modelo geométrico sólido
 RECTNG,0,LViga,0,ho/2
 RECTNG,0,LViga,ho/2,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
! 3.2 Adiciona um material da biblioteca
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,Ea
MPDATA,PRXY,1,,nu
! 3.3 Adiciona um elemento da biblioteca
ET,1,181
! 3.4 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
! 3.5 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/14
! 3.6 Cria a malha e mescla itens coincidentes
WPCSYS,-1,0
ALLSEL,ALL
AMESH,ALL
ALLSEL
NUMMRG,ALL
NUMMRG,ALL
NUMMRG,ALL
! 3.7 Aplicação das cargas no modelo MEF
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,ho
NSEL,R,LOC,Z,0
*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT
FMNODE = P/NODECOUNT
F,ALL,FY,-FMNODE
! 3.8 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+0.0001
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 C – Script para processamento de modelos com carga na mesa inferior

```

! *****APRESENTAÇÃO*****!
! DE: Diego Moreira Machado, Carla Cristiane Silva e Marina Molinar Gonzales
! SCRIPT PARA CÁLCULO DE MOMENTO CRÍTICO
! PERFIL I METÁLICO COM VÍNCULOS DE GARFO E CARGA NA MESA INFERIOR
! UNIDADES UTILIZADAS: kN, m
! ÚLTIMA REVISÃO: 01/07/2021
! NOTAS:
! - Itens precedidos'!' são comentários e não comandos
! - Não há diferença entre maiúsculo e minúsculo.
! -----!
! 1. INICIALIZAÇÃO DO ANSYS
! -----!
/CLEAR,START
/UIS,MSGPOP,4
/NERR,0,,,0
/BATCH
IMMED,0
! -----!
! 2. PARÂMETROS DE ENTRADA
! -----!
! Parâmetros referentes aos materiais
Ea = 200000000          ! [kN/m2] Módulo de elasticidade do aço
nu = 0.3                ! [adm] Coeficiente de Poisson
! Parâmetros geométricos
LViga = 4.80           ! [m] Comprimento da viga
ho = 0.60              ! [m] Distância entre as faces da mesa
bfz = 0.20             ! [m] Largura da Mesa
tfy = 0.016           ! [m] Espessura da Mesa
twz = 0.0284          ! [m] Espessura da Alma
! Parâmetros referentes a condição de contorno
P = 1*LViga           ! [kN.m] Força atuante
! -----!
! 3. PRÉ-PROCESSAMENTO
! -----!
! Construção do modelo antes de fazer a solução
/PREP7
MODNAME = 'FLT01'
Lmodelo = LViga
! 3.1 Cria as áreas do modelo geométrico sólido
RECTNG,0,LViga,0,ho/2
RECTNG,0,LViga,ho/2,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
! 3.2 Adiciona um material da biblioteca

```

```

MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,Ea
MPDATA,PRXY,1,,nu
! 3.3 Adiciona um elemento da biblioteca
ET,1,181
! 3.4 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
! 3.5 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/14
! 3.6 Cria a malha e mescla itens coincidentes
WPCSYS,-1,0
ALLSEL,ALL
AMESH,ALL
ALLSEL
NUMMRG,ALL
NUMMRG,ALL
NUMMRG,ALL
! 3.7 Aplicação das cargas no modelo MEF
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,0
*GET,NODECOUNT,NODE,0,COUNT
FMNODE = P/NODECOUNT
F,ALL,FY,-FMNODE
! 3.8 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+0.0001
CM,AUX1,NODE
NSEL,S,LOC,Z,bfz/2
NSEL,A,LOC,Z,-bfz/2

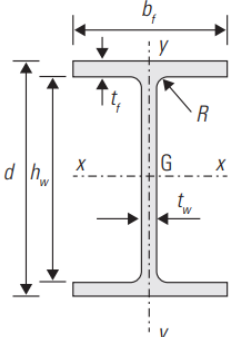
```

```

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 D – Representação da planilha eletrônica criada para os cálculos considerando o método proposto na NBR 8800:2008

Método proposto pela ABNT NBR 8800:2008					
Perfil			Legenda		
 <p>Perfil I - Seção transversal</p>			<div style="background-color: #ADD8E6; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> Dados a serem inseridos		
			<div style="background-color: #A9A9A9; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> Características do aço (fixo)		
			<div style="background-color: #9370DB; width: 20px; height: 15px;"></div> Calculados automaticamente		
Dados do Perfil			Dados do Perfil Calculados		
d	600	mm	hw	0,568	m
bf	200	mm	Agcalculado	91,13	cm ²
tf	16	mm	Ixc calculado	61877,51	cm
tw	4,777	mm	Wxc calculado	2062,58	cm ³
Dados do Aço			rx	26,06	cm
E	20000	KN/cm ²	Zxc calculado	2254,09	cm ³
fy	34,5	KN/cm ²	Iyc calculado	2133,85	cm ⁴
G	7700	KN/cm ²	ry	4,84	cm
ya1	1,1		Cw calculado	1819405	cm ⁶
			J calculado	56,68	cm ⁴
Flambagem Lateral com Torção					
	Lb	480	cm		
	λ	99,20		Para plastificação total, λ < λp	
	λp	42,38			
	β1	0,0439	cm		
	λr	110,80			
Pode ocorrer flambagem lateral com torção					
Viga Semi-Compacta					
	Cb	1,14		Cb é tomado como 1 na situação mais crítica.	
	Mcr	688,477	KNm		
	Mpl/ya1	706,97	KNm		
	Mr	498,11	KNm		
	Mrd	552,94	KNm		

	Mrd3	552,94	KNm	
--	------	--------	-----	--