



ANÁLISE NUMÉRICA E CLASSIFICAÇÃO DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS ALVEOLARES

Tiago Mocelin

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

ramo Engenharia Mecânica

Fevereiro 2020



ANÁLISE NUMÉRICA E CLASSIFICAÇÃO DE SECÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS ALVEOLARES

Tiago Mocelin

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Área de Especialização de Engenharia Mecânica
No âmbito da Dupla Diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador (IPB):
Prof. Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita
Coorientador (UTFPR):
Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto

Fevereiro 2020

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais Angelo e Cleusa. O apoio que recebi durante minha jornada acadêmica foi essencial para que eu pudesse seguir e alcançar objetivos ainda maiores. Mesmo com a distância, não foram medidos esforços. Muito obrigado por tudo.

Agradeço à minha irmã Adriane que muitas vezes pôde utilizar de sua experiência para me ajudar a entender que tudo há seu tempo e que é preciso ter paciência. Ainda, meus sinceros agradecimentos ao restante da minha família que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me e sempre torcendo pelo meu sucesso.

À minha namorada Carolina que é sempre apoio e suporte nas minhas decisões. Obrigado por me fazer entender que devemos sonhar alto e, mesmo com a distância nessa última etapa, ser uma pessoa tão especial e presente.

Aos meus amigos. Aos que fiz durante a graduação em Pato Branco e durante o programa de Dupla Diplomação em Bragança. Vocês se tornaram uma família para mim; foram meu apoio em todos os momentos, sem vocês certamente essa jornada teria sido muito mais difícil. Levarei nossas boas lembranças para sempre.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Luís Mesquita por toda a paciência e conhecimentos passados ao longo deste ano. Mesmo com pequenos impasses durante o trabalho, teve sempre a dedicação e entusiasmo para que este pudesse ser desenvolvido e atingir relevância.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Diego Rossetto, o qual prontamente aceitou o desafio de auxiliar na orientação deste trabalho mesmo sabendo das dificuldades de fazê-lo a distância. Tenho muito respeito e gratidão por isso e pela amizade cultivada há tanto tempo.

Por fim, agradeço a Deus. Muitas vezes foi meu refúgio e me deu forças para seguir quando as dificuldades pareciam maiores que as esperanças.

RESUMO

Com o aumento da demanda por economia de material, as vigas alveolares surgem como uma importante alternativa aos perfis I convencionais. Estas possuem aberturas regularmente espaçadas na alma, diminuindo o peso de um perfil equivalente e tornando possível a utilização das aberturas para instalações técnicas. Entretanto, as vigas alveolares são susceptíveis a mecanismos de colapso complexos e únicos. Um bom entendimento do comportamento do perfil começa pela correta classificação de sua secção transversal. Considerando a existência de metodologias de classificação que subestimam a sua resistência, é apresentado um estudo numérico com vista à reclassificação deste tipo de secções. A alma da viga alveolar é modelada numericamente como um elemento de placa com uma abertura circular no centro e carregado por esforço de compressão axial. Este modelo é desenvolvido utilizando o *método dos elementos finitos* considerando uma variação de três parâmetros: esbelteza geométrica, diâmetro da abertura e comprimento da placa. Um primeiro modelo é desenvolvido representando uma placa sólida e é calibrado de acordo com a formulação matemática, oferecendo boa correspondência. Um primeiro modelo mantém o comprimento da placa constante e igual à sua altura, sendo realizadas simulações lineares para verificação da influência de uma abertura na tensão crítica de encurvadura normalizada para várias esbeltezas geométricas, obtendo como resultado a baixa dependência da esbelteza geométrica e linear do diâmetro da abertura. O modelo é atualizado mantendo a esbelteza geométrica constante e variando diâmetro da abertura e comprimento da placa. São obtidas equações analíticas que relacionam os três parâmetros, através do ajuste linear, utilizando o *Software MATLAB*, válidas no intervalo proposto com um erro máximo de 6% em relação aos resultados numéricos. Com a tensão crítica de encurvadura de placas com aberturas, é feita a transformação destas para esbeltezas normalizadas e comparadas com os limites para classificações dadas pelo Eurocódigo 3, propondo uma nova metodologia de classificação. São analisados quatro perfis distintos, cada um representando uma classe de secção transversal, para comparação da metodologia preconizada na norma atual e da nova proposta. Pela nova metodologia, quando maior o diâmetro da abertura mais elevada a classe, contramão do proposto pelo Eurocódigo 3. Por fim, a distribuição de tensões nas placas e tensão última resistente destas são obtidas por meio de simulações não lineares considerando imperfeições geométricas mostrando boa correspondência à classificação proposta.

Palavras Chave: *Classificação da secção transversal, Vigas alveolares, Simulações numéricas, Encurvadura de placas*

ABSTRACT

With the increased demand for material savings, cellular beams emerge as an important alternative to the regular I profiles. These have regularly spaced openings on the web, reducing the weight of an equivalent I profile. Even more, allowing the use of openings for technical installations. However, it is necessary to be careful due to the cellular beams are susceptible to complex and unique collapse mechanisms. To understand the behavior of the beam profile in a good way, it's necessary to start with the correct cross-section classification. Taking account of the availability of classification methods that underestimate their resistance, a numerical study is presented in order to reclassify this type of sections. A web of the cellular beam is numerically modeled as a plate element with a circular opening in the center and is subject to axial compression stress. This model is developed using the finite element method considering a variation of three parameters: geometric slenderness, the opening diameter, and the plate length. A first model is developed representing a solid plate and is calibrated according to a mathematical approach, offering good correspondence. Keeping constant the plate length, linear simulations are performed to verify the influence of an opening in the critical normalized buckling load for different geometric slenderness, obtaining, as a result, a low influence of slenderness and linear dependence for the opening diameter. The model is updated keeping constant the slenderness ratio and varying now the opening diameter and the plate length. Analitic equations that perform the three parameters relation are obtained through linear adjustment using the *Software* MATLAB, valid in the proposed interval with a 6% of error comparing with the the numerical results. By the critical elastic load of plates with openings, a transformation of these in normalized slenderness parameters is made in order to compare with the standard limits given by Eurocode 3, proposing a new classification methodology. Four different beam profiles are analyzed, each one representing a different cross-section class in order to compare the current recommended methodology with the new proposal. By the new methodology, as an opening becomes larger, larger is the class number, unlike the Eurocode 3 approach. Finally, the stress distribution on the plates and ultimate post-buckling loads are obtained by non-linear simulations, considering geometric imperfections, with a successfully correspondence for the proposed method.

Keywords: *Cross-section classification, Cellular beams, Numerical simulations, Buckling of plates*

Índice

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VII
ÍNDICE.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS	XV
NOMENCLATURA	XVII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 DEFINIÇÃO E VANTAGENS	5
2.3 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS.....	6
2.4 MODOS DE COLAPSO	8
2.4.1 Resistência da secção transversal	8
2.4.2 Instabilidade	13
2.5 MÉTODOS DE AUMENTO DE RESISTÊNCIA	16
2.5.1 Preenchimento das aberturas	16
2.5.2 Reforço circular na abertura.....	16
2.5.3 Reforços no montante da alma	17
2.5.4 Suporte para cargas concentradas	17
2.6 ENCURVADURA DE PLACAS	18
2.6.1 Análise elástica.....	18
2.7 ESTADO DA ARTE.....	23
CAPÍTULO 3: VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE AÇO.....	30
3.1 INTRODUÇÃO.....	30
3.2 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS SÓLIDAS E ALVEOLARES.....	31

3.2.1	Resistência ao esforço de corte.....	31
3.2.2	Resistência ao momento fletor	35
3.2.3	Resistência das secções Tê.....	38
3.2.4	Resistência ao mecanismo de Vierendeel.....	38
3.2.5	Encurvadura local do montante da alma	39
3.2.6	Encurvatura lateral torsional	41
3.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO.....	43
CAPÍTULO 4: ANÁLISE NUMÉRICA DA ENCURVADURA LINEAR ELÁSTICA		47
4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	47
4.2.1	Elemento de casca SHELL181	48
4.3	ENCURVADURA ELÁSTICA DE PLACAS SÓLIDAS	49
4.4	METODOLOGIA	52
4.5	MODELO NUMÉRICO DA ENCURVADURA DO BANZO E ALMA SÓLIDA	53
4.5.1	Estudo paramétrico.....	55
4.6	MODELO NUMÉRICO DA ENCURVADURA DA ALMA ALVEOLAR	58
4.6.1	Placa quadrada.....	58
4.6.2	Placa com comprimento variável.....	62
CAPÍTULO 5: COMPARAÇÃO E APLICAÇÃO DA NOVA METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS.....		72
5.1	INTRODUÇÃO	72
5.2	CLASSIFICAÇÃO DAS SECÇÕES SEGUNDO O EC3	73
5.3	APLICAÇÃO DA NOVA METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS.....	76
5.4	VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DA PROPOSTA	80
5.5	CARGA DE COLAPSO DE PLACAS À COMPRESSÃO	84
5.5.1	Viga IPE160.....	85
5.5.2	Viga IPE240.....	87
5.5.3	Viga IPE270.....	89
5.5.4	Viga IPE300.....	91
5.6	TENSÃO ÚLTIMA DOS ELEMENTOS E ESBELTEZA NORMALIZADA	93
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		97
6.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	97
6.2	LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO	100
REFERÊNCIAS		101
ANEXOS		104
A1.	RESULTADOS DE TENSÃO CRÍTICA DE ENCURVADURA OBTIDAS NUMERICAMENTE COMPARANDO COM O MODELO MATEMÁTICO.....	105

A2.	RESULTADOS DE TENSÃO CRÍTICA DE ENCURVADURA OBTIDAS NUMERICAMENTE	108
A3.	ENCURVADURA ELÁSTICA DE PLACAS	111
A4.	TENSÃO CRÍTICA OBTIDA NUMERICAMENTE PARA ESBELTEZA GEOMÉTRICA $H_w/t = 50$..	113
A5.	TENSÃO EQUIVALENTE DE VON-MISES OBTIDAS POR SIMULAÇÕES NÃO LINEARES COM IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS.....	114

Lista de figuras

Figura 1 – Utilização de vigas alveolares na estrutura de um estacionamento, [4].....	5
Figura 2 - Método de fabricação de uma viga alveolar, [3].	6
Figura 3 - Definição das principais dimensões da viga alveolar.	7
Figura 4 – Capacidade de rotação e momento resistente de acordo com as classes de vigas, [10].	9
Figura 5 – Relações de dimensão para classificação de elementos internos, [9].	10
Figura 6 – Relações de dimensão para classificação de elementos externos, [9].....	11
Figura 7 – Distribuição de tensões na secção transversal: a) elástica e b) plástica.	12
Figura 8 – Gráfico do momento fletor em uma viga bi-apoiada com carregamento linearmente distribuído.	12
Figura 9 – Gráfico do esforço cortante global para carregamento distribuído.....	13
Figura 10 – Viga alveolar instrumentada que com falha por encurvadura do montante da alma, [5].	14
Figura 11 - Falha de uma viga com abertura circular na alma devido ao mecanismo de Vierendeel, [11].	15
Figura 12 - Modelo de falha por encurvadura lateral torsional (LTB) de uma viga alveolar carregada por momento fletor constante, [14].	15
Figura 13 – Preenchimento das aberturas da extremidade da viga alveolar, [3].	16
Figura 14 – Soldadura de um aro ao redor de uma abertura, [3].	17
Figura 15 – Alternativas para enrijecimento do montante da alma, [3].	17
Figura 16 – Enrijecedores paralelos como suporte resistivo a cargas concentradas, [3].	18
Figura 17 – Encurvadura de uma placa carregada axialmente, [16].	20
Figura 18 - Coeficiente de encurvadura para placa sob compressão simplesmente apoiada, [16].	21
Figura 19 – Exemplificação do modelo de placa axialmente comprimida.....	22

Figura 20 – Modo de encurvadura para placas muito longas com diferentes condições de fronteira, [18].....	23
Figura 21 – Distribuição de tensões e comparação dos resultados para: a) alma e b) banzo, [24].	28
Figura 22 – a) Tensão crítica normalizada em função de: a) esbelteza geométrica e b) posicionamento da abertura, para vários diâmetros [25].....	29
Figura 23 – a) Esquemático da viga ensaiada; b) Classificação proposta com base nos parâmetros estudados, [15].....	29
Figura 24 – Vigas alveolares funcionando como vigas e colunas em estruturas de edifícios, [27].....	30
Figura 25 – Parâmetros da secção transversal de uma viga alveolar.	32
Figura 26 – Área de resistência ao corte para: a. Secções laminadas e b. Secções soldadas, [6].	34
Figura 27 – Força de corte atuando longitudinalmente no montante de alma.	34
Figura 28 – Tensões no regime plástico atuantes na secção de uma viga alveolar, indicados parâmetros.	36
Figura 29 – Distribuição elástica de tensões na secção transversal da viga alveolar.....	37
Figura 30 – Forças e momentos agindo na secção crítica em torno da abertura, [2].	39
Figura 31 – Coeficientes para viga com carregamento transversal, [29].	43
Figura 32 - Momento resistente plástico normalizado de uma secção de classe 2 aplicando as condições de classificação propostas pelo EC3.....	45
Figura 33 – Momento resistente elástico normalizado de uma secção de classe 3 aplicando as condições de classificação propostas pelo EC3.....	45
Figura 34 – Representação da condição para classificação proposta pelo Eurocódigo 3. ...	46
Figura 35 – Elemento de casca SHELL181, [33].....	49
Figura 36 – Coeficiente de encurvadura k_{σ} de placas sólidas – elemento interno.	50
Figura 37 – Coeficiente de encurvadura k_{σ} de placas sólidas – elemento externo.....	51
Figura 38 – Primeiro modo de encurvadura de uma placa com um bordo livre.	52
Figura 39 – Representação do modelo de a) alma e b) banzo.	54
Figura 40 – Obtenção da carga crítica de encurvadura elástica, [33].	55
Figura 41 – Representação do padrão da viga alveolar: espaçamento S entre as aberturas.	58

Figura 42 – Modelo criado representando a alma da viga alveolar.....	59
Figura 43 – a) Aproximação dos pontos por uma superfície através do MATLAB e b) resíduos da aproximação.	61
Figura 44 – Malha gerada para análise de placas retangulares com furo.	63
Figura 45 – Primeiro modo de encurvadura elástica para a placa nas condições citadas....	64
Figura 46 – Primeiro modo de encurvadura para placa com $L/H_w = 1,6$	64
Figura 47 – Falha por encurvadura elástica para $d_0H_w = 0; 0,4; 0,8$	65
Figura 48 – Encurvadura elástica normalizada em função do comprimento da placa.	66
Figura 49 – a) Superfície aproximada em função dos parâmetros d_0H_w e LH_w para o primeiro intervalo e b) resíduos da aproximação.	69
Figura 50 – a) Superfície aproximada em função dos parâmetros d_0H_w e LH_w para o segundo intervalo e b) resíduos desta aproximação.	69
Figura 51 – Parâmetros da alma da viga alveolar.....	74
Figura 52 – Representação dos elementos constituintes da secção Tê.....	76
Figura 53 – Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE160....	78
Figura 54- Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE240.	78
Figura 55 - Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE270. ...	79
Figura 56 - Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE300. ...	79
Figura 57 – Comportamento elasto-plástico sem endurecimento, [23].....	80
Figura 58 – Modelos recomendados pelo Eurocódigo 3 para comportamento dos materiais, [23].....	81
Figura 59 – Imperfeição geométrica aplicada.	82
Figura 60 – Procedimento incremental e iterativo de Newton-Raphson, [33].....	83
Figura 61 – Resultado de distribuição da tensão de Von-Mises para IPE160.....	83
Figura 62 – Limitações de deslocamento atualizadas para os eixos x e y.....	84
Figura 63 – Deslocamentos em função da carga aplicada para IPE160.....	86
Figura 64 – Distribuição de tensões no instante do colapso: IPE160.....	87
Figura 65 – Deslocamentos em função da carga aplicada para vários diâmetros da viga IPE 240.	88

Figura 66 – Modo de colapso da viga IPE240 com diferentes diâmetros.....	89
Figura 67 – Deslocamentos em função da carga para vários diâmetros: viga IPE270.	90
Figura 68 – Distribuição de tensões no instante de colapso para viga IPE270.....	91
Figura 69 – Deslocamentos em função da carga aplicada para a viga IPE300.....	92
Figura 70 – Distribuição de tensões de Von-Mises para a viga IPE300.....	93
Figura 71 – a) Recomendação de aplicação da tensão em elementos de placa conforme Eurocódigo 3-1-5, [23]; b) Distribuição de tensões na linha e comportamento de pós encurvadura para elementos enrijecidos, [24]......	94
Figura 72 – Tensão última σ_u dos perfis analisados normalizados pela tensão de cedência em função da esbelteza normalizada λ_p	95

Lista de tabelas

Tabela 1 – Limites dimensionais recomendados pela proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2].....	7
Tabela 2 – Fatores de imperfeição, [9]	40
Tabela 3 – Curvas de encurvatura para o caso geral, [9].....	42
Tabela 4 – Dimensões das vigas IPE500 e HEA300.....	44
Tabela 5 – Rácio L/b onde ocorre a transição do número de semi-ondas de encurvatura para elemento interno.	51
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do aço $S355$	54
Tabela 7 – Casos estudados de alma sólida e banzo.....	56
Tabela 8 – Comparação dos resultados analíticos com numéricos para alma sólida.	57
Tabela 9 – Comparação dos resultados analíticos com numéricos para banzo.	57
Tabela 10 – Casos estudados de alma alveolar.....	59
Tabela 11 – Tensão crítica para uma placa com abertura central axialmente comprimida.	60
Tabela 12 – Dados simulados nesta secção.	63
Tabela 13 – Grandezas importadas para o MATLAB.....	67
Tabela 14 - Limites para classificação de elementos externos.....	73
Tabela 15 – Transformação dos limites para classificação de elementos internos.	73
Tabela 16 – Rácios d_0/H_w que provocam mudança de classes para os perfis indicados. .	75
Tabela 17 – Casos de estudo não lineares.	85
Tabela 18 – Dimensões da viga IPE160.....	85
Tabela 19 – Dimensões da viga IPE240.....	87
Tabela 20 – Dimensões da viga IPE270.....	89

Tabela 21 – Dimensões da viga IPE300.....	91
---	----

Nomenclatura

Letras maiúsculas do alfabeto Latino

S	espaçamento entre aberturas
H_s	área da superfície de um elemento por unidade de comprimento
H	altura da viga alveolar
N_{Ed}	esforço axial aplicado
N_{Rd}	esforço axial resistente
$M_{y,Ed}$	momento fletor atuante em relação ao eixo y
$M_{y,Rd}$	momento fletor resistente em relação ao eixo y
$M_{z,Ed}$	momento fletor atuante em relação ao eixo z
$M_{z,Rd}$	momento fletor resistente em relação ao eixo z
L_v	comprimento da viga
E	módulo de elasticidade do material
L	comprimento da placa analisada
N_x	esforço distribuído aplicado no elemento de placa
V_{Ed}	esforço cortante aplicado
$V_{c,Rd}$	esforço cortante resistente
$V_{pl,Rd}$	esforço cortante resistente plástico
$V_{o,pl,Rd}$	esforço cortante resistente plástico da viga alveolar
A_v	área resistente ao esforço de corte
$A_{v,T}$	área de um Tê
A_{wt}	área da alma de um Tê

A_{bt}	área do Tê inferior
$N_{pl,Rd,T}$	esforço plástico resistente de um Tê
A_f	área da flange de um Tê
$M_{N,pl,Rd}$	momento plástico resistente reduzido por esforço axial
$N_{\emptyset,Ed}$	esforço normal aplicado à secção delimitada por \emptyset no cálculo de Vierendeel
$N_{\emptyset,Rd}$	esforço normal resistente da secção delimitada por \emptyset no cálculo de Vierendeel
$M_{\emptyset,Ed}$	momento aplicado à secção delimitada por \emptyset no cálculo de Vierendeel
$M_{\emptyset,Rd}$	momento resistente da secção delimitada por \emptyset no cálculo de Vierendeel
A	área de uma secção transversal sólida
S_e	momento estático em relação ao eixo analisado
I	momento de inércia da secção
$V_{wp,Ed}$	esforço transversal atuando no montante da alma
$V_{wp,Rd}$	esforço transversal de corte resistente do montante da alma
$M_{c,Rd}$	momento resistente de uma viga
$M_{c,Ed}$	momento aplicado à uma viga
W_{pl}	módulo plástico da secção
W_{el}	módulo elástico da secção
$M_{pl,Rd}$	momento plástico resistente de uma viga
$M_{el,Rd}$	momento elástico resistente de uma viga
$N_{bT,Rd}$	esforço normal resistente do Tê inferior
$N_{wp,Rd}$	resistência à encurvadura do montante da alma
$M_{b,Rd}$	momento plástico resistente à encurvadura lateral torsional
W_y	módulo da secção em relação ao eixo fraco
M_{cri}	momento crítico para encurvadura lateral torsional

C_1	coeficiente dependente de carregamento e suporte no cálculo do momento crítico à encurvadura lateral torsional
C_2	coeficiente dependente de carregamento e suporte no cálculo do momento crítico à encurvadura lateral torsional
I_z	momento de inércia em relação ao eixo z
I_y	momento de inércia em relação ao eixo y
I_w	constante de empenamento
I_T	constante de torção
G	módulo de cisalhamento
H_w	altura da alma da viga; altura da placa estudada
$[K_s]$	matriz rigidez
$[S_t]$	matriz rigidez de tensões

Letras minúsculas do alfabeto latino

e	largura do montante da alma
h	altura da viga
w_e	largura do último montante da alma
d_0	diâmetro da abertura circular
w	largura do montante da alma
b_f	largura do banzo
t_f	espessura do banzo
c_f	comprimento em consola do banzo
c_w	comprimento em consola da alma
t	espessura da placa estudada
t_w	espessura da alma da viga
h_b	altura do Tê inferior

h_t	altura do Tê superior
c	comprimento de um elemento arbitrário durante seu tratamento de classificação
f_y	tensão de cedência do aço
ν	coeficiente de Poisson
b	largura arbitrária de um elemento de placa
a	comprimento arbitrário de um elemento de placa
n	número de semi ondas de encurvadura de um elemento de placa no sentido transversal
m	número de semi ondas de encurvadura de um elemento de placa no sentido longitudinal
k_σ	coeficiente de encurvadura para placas sólidas
r	raio de concordância entre alma e banzos
$h_{w,T}$	altura da alma do Tê
h_{eff}	distância entre os centroides dos dois Tês
z_t e z_{pl}	distância entre o centroide do plástico Tê superior e a fibra mais externa do banzo
z_{el}	distância entre o centroide elástico do Tê superior e a fibra mais externa do banzo
l_w	comprimento de encurvadura para o montante da alma
k_z e k_w	fatores de comprimento efetivo para o cálculo do momento elástico
k_1 e k_2	coeficiente do polinômio representativo da tensão crítica obtida numericamente
$k_{\sigma,h}$	coeficiente de encurvadura para placas com aberturas
$k_{\sigma,h,1-1.4}$	coeficiente de encurvadura para o primeiro intervalo de L/H_w analisado
$k_{\sigma,h,1.4-2}$	coeficiente de encurvadura para o segundo intervalo de L/H_w analisado
e_{0w}	amplitude da imperfeição geométrica utilizada

q	carga aplicada nas simulações não lineares
t_i	incremento de tempo nas simulações não lineares

Letras maiúsculas do alfabeto grego

γ_{M0}	fator parcial de segurança para vigas de aço
γ_{M1}	fator parcial de segurança para vigas de aço
ϕ	fator utilizado para cálculo da redução da resistência à encurvadura
ϕ_{LT}	fator utilizado para cálculo da redução da resistência à encurvadura lateral torsional

Letras minúsculas do alfabeto grego

ε	fator de correção para a tensão de cedência de referência do aço
θ	rotação da secção transversal de vigas de acordo com a classificação
η	parâmetro definido pelo EC3-1-5 como 1,2 para cálculo da área resistente ao esforço transversal
τ_{Ed}	resistência elástica ao esforço de corte
$\bar{\lambda}$	fator adimensional de esbelteza para a alma da viga
λ_1	fator dependente de ε
χ	fator de redução da resistência à encurvadura
α ou α_{LT}	coeficiente de redução associado à curva de encurvadura escolhida
χ_{LT}	fator de redução da resistência à encurvadura lateral torsional
$\bar{\lambda}_{LT}$	fator adimensional de esbelteza para encurvadura lateral torsional
$\bar{\lambda}_p$	esbelteza normalizada
$\sigma_{cri,s}$	tensão crítica matemática à encurvadura de um elemento de placa sólido
$\sigma_{cri,ans}$	tensão crítica à encurvadura de um elemento de placa obtido numericamente

$\sigma_{cri,n}$	tensão crítica de uma placa furada normalizada pela tensão crítica à encurvadura de uma placa equivalente sólida
$\sigma_{cri,s,mod}$	tensão crítica de uma placa sólida modificada por um fator de acordo com intervalo analisado
$\sigma_{cri,s,mod,1-1.4}$	tensão crítica de uma placa sólida modificada para o primeiro intervalo de L/H_w analisado
$\sigma_{cri,s,mod,1.4-2}$	tensão crítica de uma placa sólida modificada para o segundo intervalo de L/H_w analisado
$\sigma_{cri,h,1-1.4}$	tensão crítica à encurvadura de uma placa perfurada para o primeiro intervalo proposto
$\sigma_{cri,h,1.4-2}$	tensão crítica à encurvadura de uma placa perfurada para o segundo intervalo proposto
σ_u	tensão atuante no elemento de placa no instante do colapso
λ_i	autovalor utilizado para solução na análise de encurvadura
ψ_i	autovetor de deslocamentos.

Capítulo 1: Introdução

1.1 Contexto e motivação

Os conceitos de sustentabilidade são cada vez mais relevantes. A preocupação com o futuro das próximas gerações se estende à praticamente todas as áreas da sociedade e, nesse sentido, a utilização consciente dos recursos naturais é imprescindível para a continuação da qualidade da vida terrestre. O desenvolvimento de novos materiais e ligas proporcionou uma grande evolução do setor da construção civil, desenvolvendo muitas soluções para economia de material e aumento de desempenho.

A ideia de produzir perfis estruturais com aberturas na alma surgiu como alternativa para diminuir o custo das estruturas de aço durante a Segunda Guerra Mundial, quando se buscavam formas de obter perfis mais rígidos e mais resistentes. A popularização das vigas alveolares iniciou-se por aspectos estéticos. A arquitetura via o uso de vigas expostas em aço com aberturas circulares em sua alma como esteticamente agradável. A história mais antiga relata o uso de vigas com aberturas hexagonais em sua alma, as quais foram pioneiras nesta nova concepção. Esta configuração, embora sendo de manufatura mais simples pois necessitava de apenas um corte em zigue-zague, permitia um menor incremento na altura final do perfil e, conseqüentemente, não atingia os valores de momento de inércia e módulo de secção da viga alveolar, [1].

Amplamente difundidas na atualidade, as vigas alveolares são perfis estruturais normalmente tipo I ou H os quais tem aberturas regularmente espaçadas em sua alma. A fabricação deste tipo de viga permite um grande aumento no módulo da secção, aumentando sua resistência principalmente à esforços de flexão sem aumentar a massa total da estrutura. Ainda, as aberturas presentes na alma podem ser utilizadas para instalações técnicas, diminuindo a altura total de um piso de um edifício, por exemplo, visto que podem comportar os condutores de água, esgoto, gás, eletricidade, etc.

Mesmo com grandes e inegáveis vantagens, é necessário ter bastante atenção durante o dimensionamento dessas estruturas. Os modos de colapso são influenciados por muitas variáveis geométricas construtivas das vigas alveolares, como diâmetro ou largura da abertura, espaçamento entre furos, etc. Deve-se citar a ocorrência de fenômenos de perda de estabilidade que acontecem exclusivamente em vigas com aberturas na alma, como é o caso do desenvolvimento do mecanismo de Vierendeel. Para tal, muitos recursos materiais, computacionais e intelectuais tem sido dedicados para compreender melhor o comportamento desse tipo de perfil, principalmente nos últimos anos.

Ainda hoje, mesmo quase uma centena de anos após o surgimento de perfis com aberturas na alma, alguns aspectos encontram-se com carência de estudo e/ou normatização, como é o caso da classificação da seção transversal. A classificação da seção transversal é um dos primeiros procedimentos necessários para o dimensionamento dos perfis e requer muita atenção por parte do projetista. Atualmente, não é encontrada com exatidão em normas uma metodologia confiável e amplamente estudada para a classificação das seções transversais. Nos últimos anos, muitos autores tem feito referência à classificação dos elementos sobre a carência de material disponível para um consenso da comunidade pesquisadora, chamando atenção para tópicos recorrentes.

Como mencionado anteriormente, uma viga alveolar é composta pela repetição de aberturas circular na alma da viga de maneira regular. Desta forma, é possível isolar um segmento, o qual repetido um determinado número de vezes, compõe a viga alveolar. No presente trabalho este segmento será analisado e modelado como um elemento de placa com uma abertura central, tendo altura correspondente à altura da alma da viga, desconsiderando os raios de concordância entre alma e banzos. Neste sentido, o este trabalho tratará da classificação da seção transversal de vigas alveolares por meio da modelagem e análise através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Consequentemente, é alimentado o repositório com material sobre o estudo com o intuito de colaborar com a expansão do uso deste tipo de elemento estrutural, com segurança e normatização.

1.2 Objetivos

Visto a contextualização apresentada anteriormente, pretende-se desenvolver uma metodologia de classificação da seção transversal, buscando entender melhor o comportamento e influência este parâmetro tão importante no dimensionamento dos perfis.

Ainda, espera-se fazer uma comparação entre a metodologia proposta e o recomendado pela proposta de norma, ainda em construção, do Eurocódigo 3-1-13, [2]. Para atingir este objetivo geral, são seguidos os objetivos específicos a seguir:

1. Realizar um estudo sobre a metodologia utilizada pelo Eurocódigo 3 para classificação de secções transversais;
2. Criação de um modelo numérico de referência utilizando o *Software Ansys Mechanical APDL*, permitindo calibrar o modelo de uma placa sólida com o desenvolvimento matemático disponível na literatura para encurvadura elástica;
3. Modelar a alma da viga I como um elemento de placa e atualizar o modelo criado para comportar o furo da alma da viga alveolar;
4. Analisar a influência de variações na esbelteza geométrica, diâmetro da abertura e espaçamento entre aberturas adjacentes na tensão crítica à encurvadura;
5. Com base no modelo numérico desenvolvido, propor equacionamento capaz de descrever tensão crítica elástica em função dos parâmetros analisados;
6. Propor uma nova metodologia de classificação;
7. Comparar a nova metodologia com a disponível no Eurocódigo 3, identificando coerência ou incoerência entre as abordagens por meio de análises numéricas não lineares utilizando imperfeições geométricas.

1.3 Organização da tese

O presente trabalho tem estrutura baseada em seis capítulos. O primeiro deles apresenta uma breve contextualização sobre o assunto tratado e sobre a relevância do tema. Ainda, são mostrados os objetivos almejados.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico do trabalho, apresentando as vantagens de utilização de vigas alveolares, seu processo de fabricação e vantagens. É explicado sobre os principais modos de colapso de vigas alveolares, como se desenvolvem e quais as consequências. Ainda, é mostrado algumas estratégias comuns para aumentar a resistência dessas vigas. É apresentado o modelo matemático de uma placa sujeita a esforço compressivo, a qual apresenta instabilidade por encurvadura elástica. Por fim, o tema em questão é contextualizado por meio do estado da arte, onde são apresentados estudos relevantes de diversos autores nos últimos anos.

O capítulo 3 apresenta a metodologia de dimensionamento de vigas alveolares sob as perspectivas de modos de falha apresentados no Capítulo 2 em temperatura ambiente, abordando a resistência em relação aos fenômenos citados e o impacto no comportamento global à flexão quando aplicada a metodologia de classificação proposta pelo Eurocódigo 3.

O Capítulo 4 trata da modelagem e análise de um elemento de placa, o qual representa um segmento da alma da viga alveolar. São sucintamente apresentadas as características e no que consiste o Método dos Elementos Finitos (MEF), o elemento utilizado e justificativa de escolha. São feitas simulações numéricas utilizando o *Software Ansys Mechanical APDL*, abordando a influência da variação dos parâmetros geométricos intitulados de esbelteza geométrica, diâmetro e espaçamento entre aberturas. A análise das simulações executadas torna possível a proposta de equações capazes de descrever o comportamento de encurvadura elástica de placas dentro do domínio fixado com precisão.

No Capítulo 5, são propostos limites de classificação segundo a nova metodologia. Ainda, são transformados os limites do Eurocódigo 3 para tornar possível a comparação entre as abordagens. A nova metodologia tem sua veracidade e precisão testada por meio de simulações numéricas não lineares utilizando o *Software Ansys Mechanical APDL*.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões obtidas com o presente trabalho e norteia futuras linhas de investigação para melhorar a previsibilidade de comportamento de vigas alveolares.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Com o passar dos anos, cada vez mais as vigas alveolares são utilizadas em construções metálicas. Além de proporcionar um ganho de vão livre quanto comparadas à viga original devido ao incremento de altura do perfil, permite o desenvolvimento de um novo conceito arquitetônico. Isso ocorre graças à sua leveza visual e possibilidade da passagem de tubulações e instalações técnicas pelas aberturas na alma da viga. A acomodação de instalações no interior da viga, como mostrado na Figura 1, otimiza o espaço físico vertical requerido para um pavimento, por exemplo, [3].



Figura 1 – Utilização de vigas alveolares na estrutura de um estacionamento, [4].

2.2 Definição e vantagens

Essencialmente, são vigas em I laminadas a quente, as quais tem suas almas cortadas, defasadas e posteriormente soldadas, dando origem a perfis com maior altura e com aberturas circulares na alma regularmente distribuídas ao longo da viga, [5].

Vigas com aberturas na alma surgiram por duas grandes razões: a primeira delas é aumentar o módulo da secção sem incrementar a massa de aço e a segunda é possibilitar a passagem de instalações técnicas por essas aberturas, diminuindo a altura total necessária do piso. Do ponto de vista de posicionamento das aberturas, essas podem ser isoladas, onde a interação entre os furos é mínima e aberturas regularmente espaçadas, as quais são mais próximas e ocorre interação entre elas, [6].

O processo de fabricação de vigas alveolares é relativamente simples e se baseia no uso de perfis em I, os quais são duplamente cortados utilizando normalmente o processo de oxicorte ou plasma e posteriormente defasados e soldados, antes de cortar as extremidades sobressalentes, conforme mostra a Figura 2. De acordo com a necessidade do cliente, as aberturas podem apresentar variados formatos, como hexagonais, circulares ou quadradas e variadas dimensões, resultando em variadas características estruturais. O presente trabalho apenas tratará das aberturas circulares, [3].

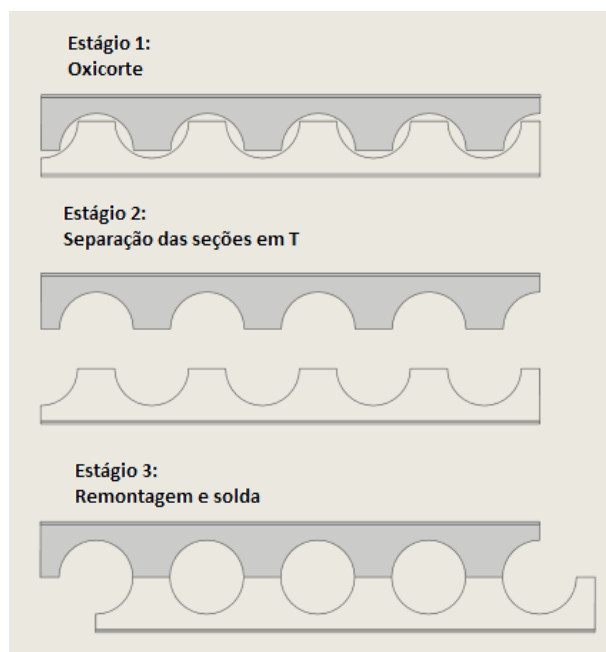


Figura 2 - Método de fabricação de uma viga alveolar, [3].

2.3 Características dimensionais

Conforme o trabalho de Pachpor et al, existem limites para as características e posicionamento dos furos de uma viga alveolar para que as normas existentes possam ser utilizadas. Essas recomendações são mostradas na Equação (1) e Equação (2) e ilustrados na Figura 3, [7]:

$$1.08 < \frac{S}{d_0} < 1.5 \tag{1}$$

$$1.25 < \frac{H}{d_0} < 1.75 \tag{2}$$

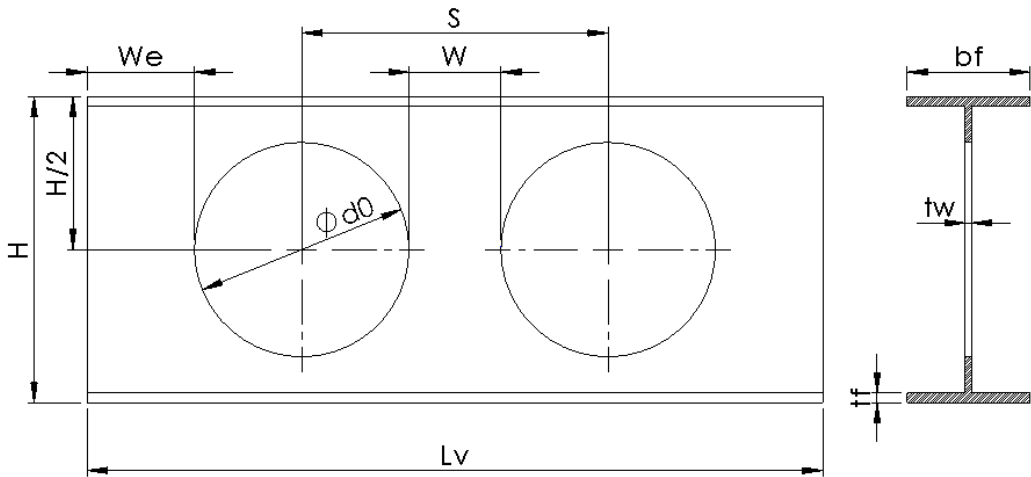


Figura 3 - Definição das principais dimensões da viga alveolar.

Quanto é feito um corte transversal na viga alveolar no centro da abertura, tem-se essencialmente duas secções em Tê, cada qual formada por uma flange e uma parte da alma da viga, acima ou abaixo da abertura. Algumas regras suplementares e atualizadas são dadas pela proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], para as dimensões mínimas da alma do Tê de uma viga alveolar, conforme mostrado na Tabela 1, [2].

Tabela 1 – Limites dimensionais recomendados pela proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2].

Formato da Abertura	Diâmetro máximo da abertura	Comprimento mínimo da alma do Tê
Circular	$0.8 * H$	$h_t \text{ e } h_b \geq t_f + r + 10mm$ $\text{mas } \geq t_f + 30mm$

2.4 Modos de colapso

O comportamento das vigas alveolares submetidas a cargas externas é notoriamente mais complexo que o das vigas regulares. Embora possam falhar de maneira similar a vigas sólidas, as vigas com aberturas na alma estão susceptíveis a outros modos de falha, como encurvadura do montante da alma, mecanismo de Vierendeel, ruptura da soldagem da alma, etc. Ainda existem registros de falhas por outros fenômenos, visto a possibilidade de variar uma grande quantidade de parâmetros geométricos, porém os citados anteriormente são os mais usuais, [5].

2.4.1 Resistência da secção transversal

Inicialmente, deve sempre ser verificado se o esforço ou combinação de esforços atuando na secção transversal da viga não é superior à sua resistência. De maneira conservativa, para qualquer secção transversal, a soma linear das razões de utilização da viga deve satisfazer a seguinte condição, [8]:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (3)$$

Onde N_{Ed} representa o esforço normal atuante, $M_{y,Ed}$ o momento fletor agindo em torno do eixo de menor momento de inércia e $M_{z,Ed}$ o momento fletor em relação ao eixo de maior momento de inércia. Os termos no denominador, os quais apresentam o subíndice Rd , se referem as respectivas resistências para o esforço correspondente do numerador, já levando em consideração quaisquer reduções aplicáveis.

2.4.1.1 Propriedades e classificação da secção transversal

Dependendo a análise requerida, as propriedades da secção transversal podem ser determinadas usando as dimensões nominais, sem a necessidade de descontar aberturas ou furos de ligações, são chamadas propriedades da secção transversal bruta. Ainda, tem-se as propriedades da área útil, a qual desconta da área bruta todos os furos e aberturas, [9].

A classificação da secção transversal de uma viga impacta diretamente na sua abordagem de dimensionamento. Este parâmetro identifica a capacidade da secção

transversal em atingir a tensão de cedência de maneira uniforme, com distribuição elástica ou colapso prematuro. Conforme a esbelteza e capacidade de rotação das vigas, estas podem ser de classe 1, 2, 3 ou 4, como mostrado na Figura 4 de acordo com Eurocódigo 3. Nesta imagem é mostrado o momento resistente, sendo este plástico ou elástico e a quantidade de rotação desenvolvida pelas classes (θ). É comum que demais normas utilizem a nomenclatura de compacta, semi-compacta ou esbelta. Segundo as normas europeias, as classes definidas são as seguintes, [9]:

- Classe 1: caracterizada por uma secção transversal que permite a formação de rótulas plásticas sem redução da sua resistência, desenvolvendo rotação suficiente para a análise global plástica;
- Classe 2: podem atingir o momento plástico em toda a secção, mas tem sua rotação limitada pela encurvatura local;
- Classe 3: as secções transversais de classe 3 são as que atingem o momento plástico na fibra mais externa do perfil, porém permite apenas uma distribuição elástica de tensões, visto que a encurvadura local inibe que o momento plástico seja atingido por completo;
- Classe 4: secção que está sujeita em um ou mais locais a ocorrência de encurvadura local antes de atingir a tensão de cedência do material em qualquer ponto.

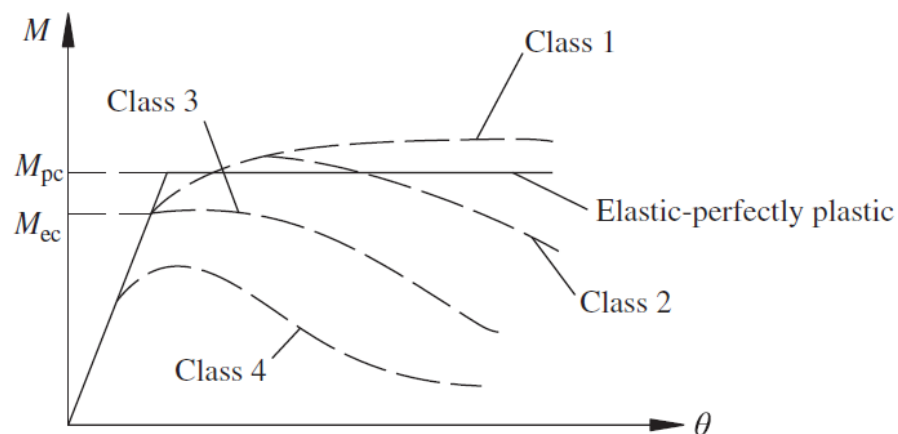


Figura 4 – Capacidade de rotação e momento resistente de acordo com as classes de vigas, [10].

Para classificar as secções transversais, é necessário que seja analisada individualmente a relação entre comprimento e espessura de todos os componentes que

constituem a secção, estando estes completamente ou parcialmente sob compressão. As normas em vigor atualmente fazem a classificação dos elementos considerando individualmente as placas que compõe a secção transversal, com isso, é possível se obter uma classificação para a alma da viga diferente do banzo. Nesse caso, deve-se adotar como sendo a secção transversal da classe mais elevada obtida, ou seja, a menos favorável. Os valores limites que governam essa classificação estão listados na Figura 5 e Figura 6. As vigas que não satisfazem os limites descritos são automaticamente classificadas como sendo de classe 4, [9].

Componentes internos comprimidos						
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$		quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1^{*)}$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

^{*)} $\psi \leq -1$ aplica-se quando a tensão de compressão $\sigma \leq f_y$ ou quando a extensão de tracção $\epsilon_y > f_y/E$.

Figura 5 – Relações de dimensão para classificação de elementos internos, [9].

Banzos em consola						
Secções laminadas				Secções soldadas		
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão				
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver a EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 6 – Relações de dimensão para classificação de elementos externos, [9].

Nota-se uma expressiva diferença entre os limites para componentes internos e externos do perfil. Quando se trata de uma viga alveolar, tem-se um misto de uma viga I usual, e uma secção composta por 2 Tê. Embora a classificação da flange não varie, a alma agora é um componente externo e, seguindo o método anteriormente descrito, sua classificação depende do diâmetro da abertura. Para evitar essa dependência da abertura, a proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], introduz alguns métodos de simplificação da classificação, aplicáveis nos casos de momento fletor puro.

Exemplificando, quando a flange for de classe 1 ou 2, a alma será classificada automaticamente de classe 2, ignorando a porção em compressão maior que $10\epsilon t_w$. Para o caso de uma flange de classe 3, a mesma regra se aplica, porém com limite de $14\epsilon t_w$, [2], sendo justamente limites para elementos externos sob compressão. Essencialmente, a

proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], recomenda que uma parte da alma da viga seja ignorada.

2.4.1.2 Momento fletor

A existência de um momento fletor em uma viga gera, em condições usuais, uma tensão compressiva na região acima da linha neutra (N.A) e trativa abaixo desta, conforme a Figura 7, válido para o caso de momento fletor puro. Extendendo a análise para o caso de vigas alveolares, tem-se agora um secção 2-Tê, onde o Tê superior está sob compressão e o Tê inferior sob tração (condição normal). As verificações de segurança devem ser feitas no centro da abertura, sendo diretamente relacionadas com a classificação da secção, sendo permitida a análise plástica para secções 1 e 2 e elástica para 3 e 4. Na Figura 8, percebe-se que o ponto crítico para o momento fletor é na posição $L_v/2$, para uma viga com comprimento L_v , [6].

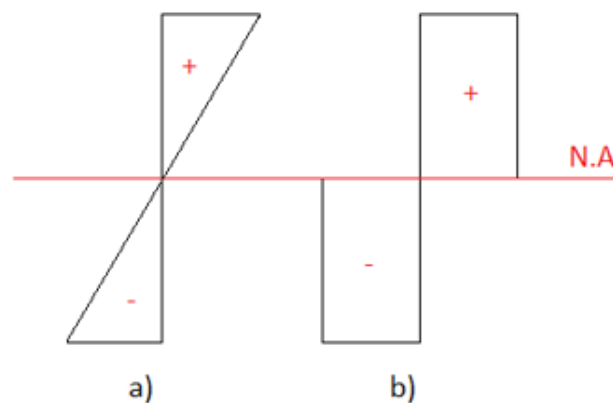


Figura 7 – Distribuição de tensões na secção transversal: a) elástica e b) plástica.

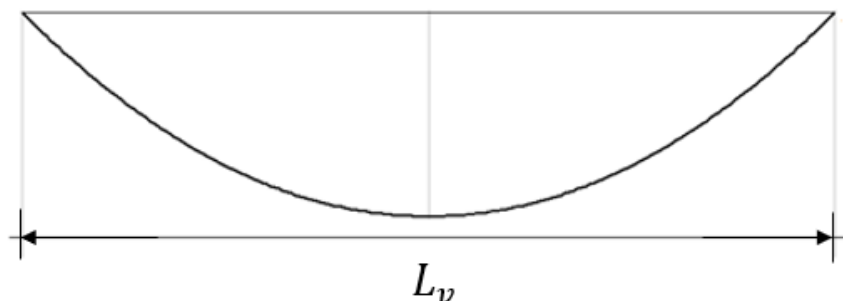


Figura 8 – Gráfico do momento fletor em uma viga bi-apoiada com carregamento linearmente distribuído.

2.4.1.3 Cisalhamento

Efetivamente, um esforço de cisalhamento é caracterizado por uma força perpendicular à determinada secção, a qual tende a “cortá-la”. Como mostrado na Figura 9, os maiores esforços cortantes se concentram nas extremidades da viga, para o caso de carregamento distribuído. Embora não representado na figura mencionada, é possível da ocorrência de um pico no esforço cortante quando há aplicação de uma força concentrada. Nesse contexto, a existência de aberturas na alma pode alterar substancialmente a resistência global da viga, uma vez que a área da alma que efetivamente suporta o esforço é reduzida. Porém, é comum que a redução da resistência ao corte seja aceitável, uma vez que existem métodos para elevar a resistência ao cisalhamento apenas nas regiões de maior necessidade, como as extremidades ou pontos com concentração de força, [6]. Os métodos de aumento da resistência de vigas alveolares são abordados na sequência.

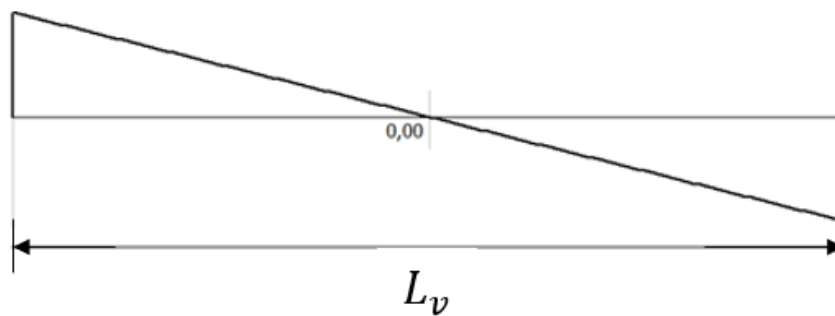


Figura 9 – Gráfico do esforço cortante global para carregamento distribuído.

2.4.2 Instabilidade

Como já mencionado, a existência de aberturas na alma altera substancialmente o comportamento de uma viga. Além da resistência da secção transversal, outros mecanismos de colapso são atingidos pela instabilidade da flange, montante da alma ou da secção 2-Tê. Nesta categoria de colapso é comum a ocorrência de encurvaduras, do montante da alma, encurvadura lateral ou desenvolvimento do mecanismo de Vierendeel, [5].

2.4.2.1 Encurvadura do montante da alma

É chamado de montante da alma a parcela da viga que está entre uma abertura e outra, ou seja, onde a viga efetivamente apresenta uma secção I. De acordo com o SCI (Steel

Construction Institute), [6], esta região da viga está sujeita a ação de três principais esforços, os quais podem provocar a encurvadura desse elemento, são eles:

- Esforço cortante transversal, na sua região mais estreita;
- Compressão devido à ação do esforço vertical de corte;
- Momento fletor devido ao desenvolvimento do Mecanismo de Vierendeel.

A falha por encurvadura do montante da alma está mostrado na Figura 10.

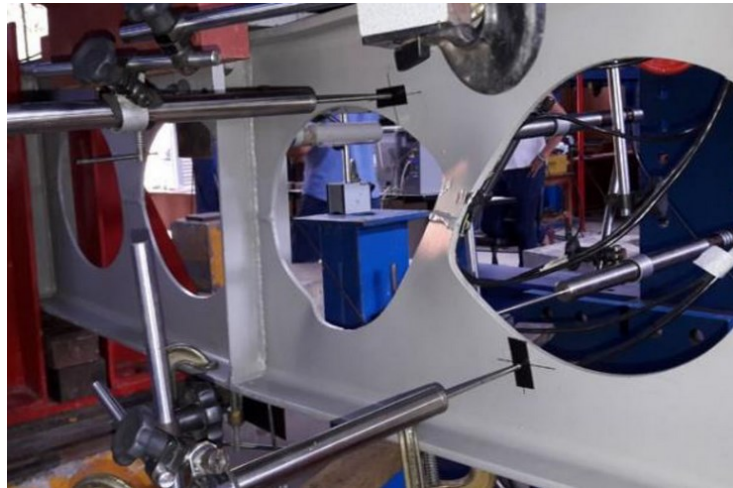


Figura 10 – Viga alveolar instrumentada que com falha por encurvadura do montante da alma, [5].

2.4.2.2 Mecanismo de Vierendeel

Um dos modos de colapso que mais requer atenção, principalmente para vigas curtas, é o Mecanismo de Vierendeel. Este fenômeno é caracterizado pela plastificação das 4 secções-Tê em volta de uma abertura, como mostra a Figura 11. A criação das rótulas plásticas é função direta da classificação da alma dos Tês, a qual é feita de maneira específica. Essencialmente, análise plástica é permitida apenas para Classes 1 e 2 e elástica para Classes 3 e 4. É chamado de Momento de Vierendeel a transferência de esforço cortante através de uma grande abertura, o qual provoca uma rotação das secções Tê em torno dessa abertura. É necessário que a resistência dessas secções Tê sejam suficientemente elevadas para que a estabilidade da viga seja mantida, [6].

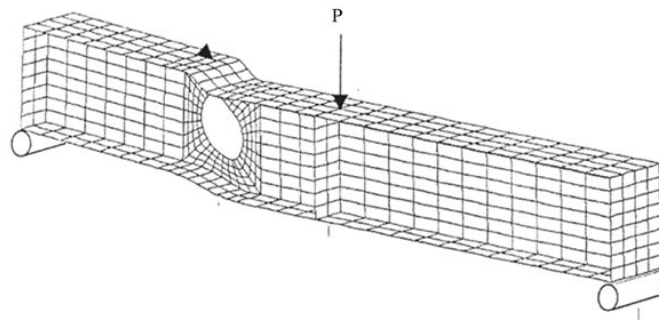


Figura 11 - Falha de uma viga com abertura circular na alma devido ao mecanismo de Vierendeel, [11].

2.4.2.3 *Encurvadura lateral torsional*

Como já citado, um carregamento aplicado na flange superior de uma viga I provoca uma tensão compressiva na flange superior e dependendo das condições de travamento desta, pode ser verificado um colapso por encurvadura lateral torsional. O trabalho de Sonck, [12], revela que o modo de colapso de vigas carregadas por momento fletor é na maioria dos casos devido à encurvadura lateral torsional (LTB). Cabe lembrar que este modo de falha é comum tanto para vigas sólidas como alveolares e está mostrado na Figura 12.

A ocorrência deste fenômeno está diretamente relacionado ao fato de ter um dos Tês sob compressão e o outro sob tração. O Tê superior, normalmente sob compressão, tende a encurvar lateralmente. Contudo, a flange superior continua conectada a flange inferior através do montante da alma ou da alma completa, para um perfil sólido e, como a flange inferior está sob tração, esta limita o deslocamento lateral, provocando uma rotação no perfil, [13].



Figura 12 - Modelo de falha por encurvadura lateral torsional (LTB) de uma viga alveolar carregada por momento fletor constante, [14].

2.5 Métodos de aumento de resistência

As vigas alveolares apresentam uma grande quantidade de vantagens, mas paralelamente, possuem limitações. Como característica, uma parcela significativa da alma é retirada e essa falta de material afeta diretamente a resistência do elemento à alguns fenômenos, por exemplo, ao esforço cortante. Em alguns casos, é necessário que essa resistência seja melhorada localmente, atingido o nível de segurança exigido.

2.5.1 Preenchimento das aberturas

Anteriormente foi apresentado o comportamento do esforço cortante ao longo da viga e pôde ser percebido que as extremidades estão sujeitas aos maiores valores, salvo casos em que haja aplicação de elevada força concentrada. Para tal, é possível que os furos das extremidades sejam cobertos. Esse processo é relativamente simples, consiste na soldadura de um disco no local da abertura, conforme mostrado na Figura 13. Importante ressaltar que a espessura do disco não é necessariamente a mesma da alma da viga, esta é escolhida em função das tensões agindo no local, [3].



Figura 13 – Preenchimento das aberturas da extremidade da viga alveolar, [3].

2.5.2 Reforço circular na abertura

Por razões estéticas ou pela necessidade de manter a abertura disponível para instalações técnicas, pode ocorrer a impossibilidade de cobrir esta com um disco. Nesses casos, é comum a soldura de um aro ao redor da abertura, dessa forma aumentando a rigidez

do elemento e sua capacidade de suportar esforços cortantes maiores. Esta solução é mostrada na Figura 14, [3].

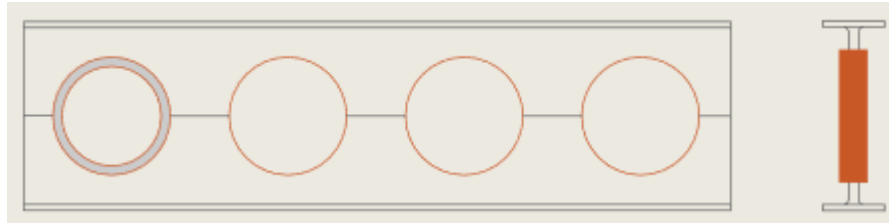


Figura 14 – Soldadura de um aro ao redor de uma abertura, [3].

2.5.3 Reforços no montante da alma

Uma viga alveolar depende da escolha de muitas variáveis para ser fabricada, de forma que a otimização dos parâmetros é algo crucial para a criação de um bom perfil estrutural. Muitas vezes, porém, o projetista fica limitado devido a grande esbelteza do montante da alma. Para contornar essa limitação, pode ser usado reforço no montante da alma como forma de uma placa rígida soldada ou ainda dois semi aros soldados nas aberturas adjacentes ao montante que pretende ser enrijecido. Essa solução é mostrada na Figura 15, [3].

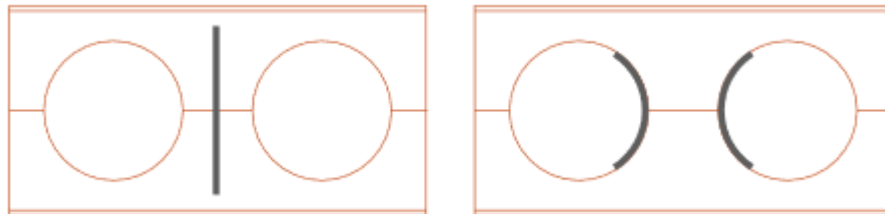


Figura 15 – Alternativas para enrijecimento do montante da alma, [3].

2.5.4 Suporte para cargas concentradas

A aplicação de cargas concentradas em determinados pontos de uma viga pode alterar seu comportamento global. Para evitar a necessidade de sobredimensionamento de todo o perfil para compensar a demanda local por resistência, podem ser combinadas algumas soluções. A forma mais usual de prevenção do colapso do elemento é feita com a soldadura de enrijecedores, aumentando a resistência à encurvadura da porção da viga analisada. A solução é mostrada na Figura 16, [3].

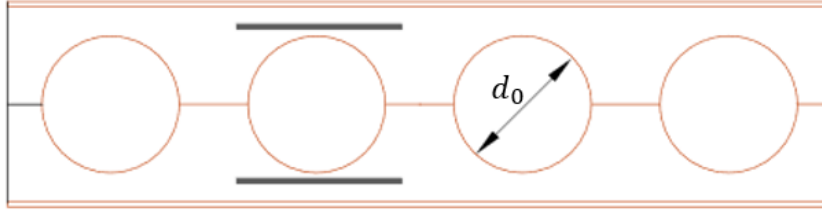


Figura 16 – Enrijecedores paralelos como suporte resistivo a cargas concentradas, [3].

2.6 Encurvadura de placas

2.6.1 Análise elástica

Toda a teoria da classificação das secções transversais se baseia no comportamento de placas individuais. Embora atualmente existam muitos estudos que indiquem uma intensa interação entre a alma e flange de vigas I, as normas em vigor atualmente não levam esse aspecto em conta para a classificação da secção transversal, [15].

Placas metálicas são amplamente utilizadas em vários setores da engenharia. Diferentemente de vigas, as quais em geral tem uma dimensão muito maior que as demais, as placas, normalmente, têm largura próxima ao comprimento, exigindo uma modelagem em duas dimensões. O modo de falha de pilares e placas carregados por força compressiva é similar, caracterizado pela encurvadura do elemento. Porém, a grande diferença reside na capacidade das placas de continuar a suportar tensão após a falha por encurvadura, o qual caracteriza um fenômeno conhecido como resistência à pós encurvadura,[16].

Para iniciar o desenvolvimento de modelos analíticos, assume-se uma placa retangular perfeita, simplesmente suportada ao longo das quatro linhas, como mostrado na Figura 17. Ainda, aplica-se uma força compressiva N_x por unidade de comprimento ao longo do eixo x . Para este caso, o equilíbrio é regido pela Equação (4), [16].

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2 \partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{12(1 - \nu^2)}{Et^3} \left(-N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

Nesta primeira equação para placas, define-se ν como o coeficiente de Poisson; E como módulo de elasticidade; t a espessura da placa e w como a deflexão na direção z , o qual pode ser escrito como a Equação (5).

$$w = \sum_{m=1,2,3,\dots} \sum_{n=1,2,3,\dots} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (5)$$

Onde m e n indicam o número de semi ondas senoidais na placa encurvada. Ainda, a representa o comprimento da placa, mais intuitivamente tratado como L e b é a largura da placa. Nota-se que o modelo proposto automaticamente corresponde com as condições de fronteira de rótula assumidas. Exemplificando: $w = 0$ em $x = 0, x = a, y = 0$ e $y = b$. Combinando as Equações (4) e (5), obtém-se:

$$\left(\frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2 \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} \right) = \frac{12(1 - \nu^2)}{Et^3} N_{x,cri} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \quad (6)$$

Rearranjando os termos:

$$N_{x,cri} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{(m^2 / a^2 + n^2 / b^2)^2}{m^2 / a^2} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{m}{a} + \frac{n^2 a}{mb^2} \right)^2 \quad (7)$$

Quando o número n assume o valor unitário, representando apenas uma semi onda no sentido transversal da placa, tem-se o menor valor de força crítica de encurvadura ($N_{x,cri}$) de acordo com a Equação (7). Aplicando essa condição, tem-se a Equação (8).

$$N_{x,cri} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1 - \nu^2)b^2} \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (8)$$

Para simplificação, pode ser chamado o conteúdo entre parênteses de k_σ e notar que tensão crítica é resultado da divisão da força - [N/m] ou [N/mm] – pela espessura t da placa. Com isso, é obtida a Equação (9), a qual descreve a tensão crítica para encurvadura de uma placa fina sujeita a esforço compressivo, [16].

$$\sigma_{cri,s} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b/t)^2} \quad (9)$$

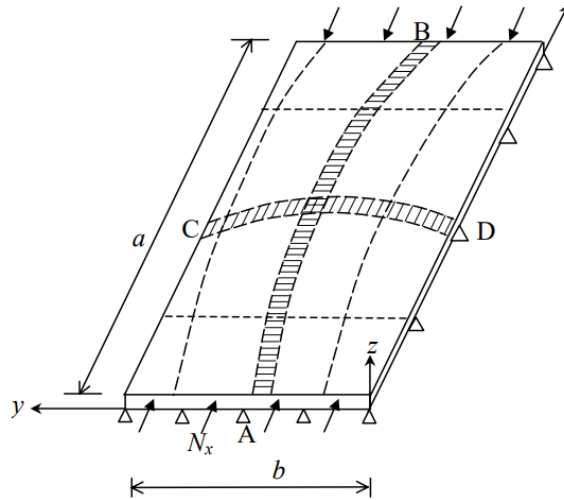


Figura 17 – Encurvadura de uma placa carregada axialmente, [16].

Nota-se que a tensão crítica para encurvadura de uma placa é função da razão largura-espessura b/t da placa. Parâmetro chave na classificação da secção transversal dos elementos. Para garantir que a placa sustente o esforço necessário e falhe por cedência antes da encurvadura, é necessário estipular os limites da razão b/t , os quais podem ser obtidos através da Equação (10). Ademais, a Figura 18 o mostra o comportamento do coeficiente k_σ em função do número de semi-ondas no sentido longitudinal e razão entre comprimento e altura da placa a/b . Percebe-se que o menor valor possível é 4, para os vários valores de m , em função da razão comprimento-largura. Para tal, esse é o valor do coeficiente de encurvadura para o caso da placa muito longa simplesmente apoiada, [16].

$$\left(\frac{b_{lim}}{t} \right) \leq \left(\frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1 - \nu^2) f_y} \right)^{1/2} \quad (10)$$

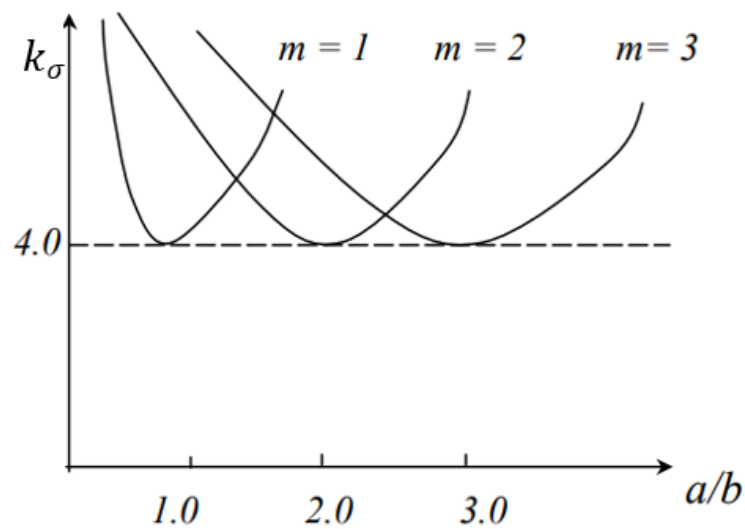


Figura 18 - Coeficiente de encurvadura para placa sob compressão simplesmente apoiada, [16].

Reitera-se que o modelo foi desenvolvido para uma placa simplesmente apoiada ao longo das quatro linhas. É possível, entretanto, que existam outras condições de fronteira. Para abranger as demais condições, o coeficiente k_σ pode assumir os variados valores que são apresentados na sequência enquanto o restante da expressão permanece inalterada. Para perfis laminados a quente, como os usados neste trabalho, percebe-se que a flange pode ser modelada como uma placa possuindo uma linha simplesmente apoiada e outra livre, configuração que recebe o nome de elemento externo. Já a alma, é simplesmente apoiada ao longo das duas linhas de conexão com as flanges, recebendo o nome de elemento interno. Ainda, definem-se as demais linhas, transversais ao comprimento do perfil, como sendo simplesmente apoiadas, [16]. O modelo descrito é dado na Figura 19. Onde a representa o comprimento de um elemento de placa qualquer, b a largura e N_x a força compressiva atuante.

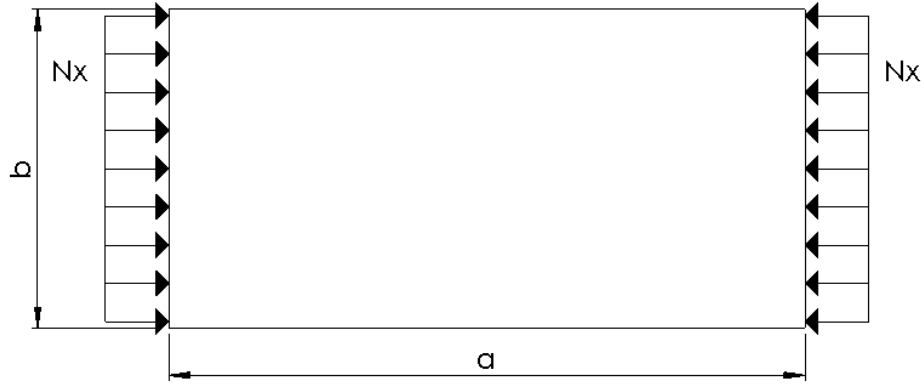


Figura 19 – Exemplificação do modelo de placa axialmente comprimida.

Conforme o trabalho desenvolvido por Timoshenko & Gere, [17], o coeficiente de encurvadura que descreve a condição de fronteira caracterizada por uma extremidade apoiada e outra livre é descrito pela Equação (11). Cabe lembrar que este foi desenvolvido especialmente para um coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$. Não sendo o representativo para o aço. Para tal, este trabalho é combinado com o trabalho desenvolvido por Schafer, [18], o qual propõe um coeficiente de encurvadura $k_\sigma = 0,425$ para a condição de placa muito longa. Como resultado desta combinação o presente trabalho utilizará um k_σ dado pela Equação (12).

$$k_\sigma = \left(0,456 + \frac{b^2}{a^2} \right) \quad (11)$$

$$k_\sigma = \left(0,425 + \frac{b^2}{a^2} \right) \quad (12)$$

A Figura 20 apresenta os valores para coeficiente de encurvadura para diferentes condições de fronteira para placas muito longas. Porém, conforme a razão entre comprimento e largura da placa se altera, o coeficiente de encurvadura k_σ tem um comportamento variado e assume valores diversos dos apresentados, principalmente para placas com menores rácios a/b . Esse comportamento exige atenção especial quando o estudo abrange placas neste intervalo.

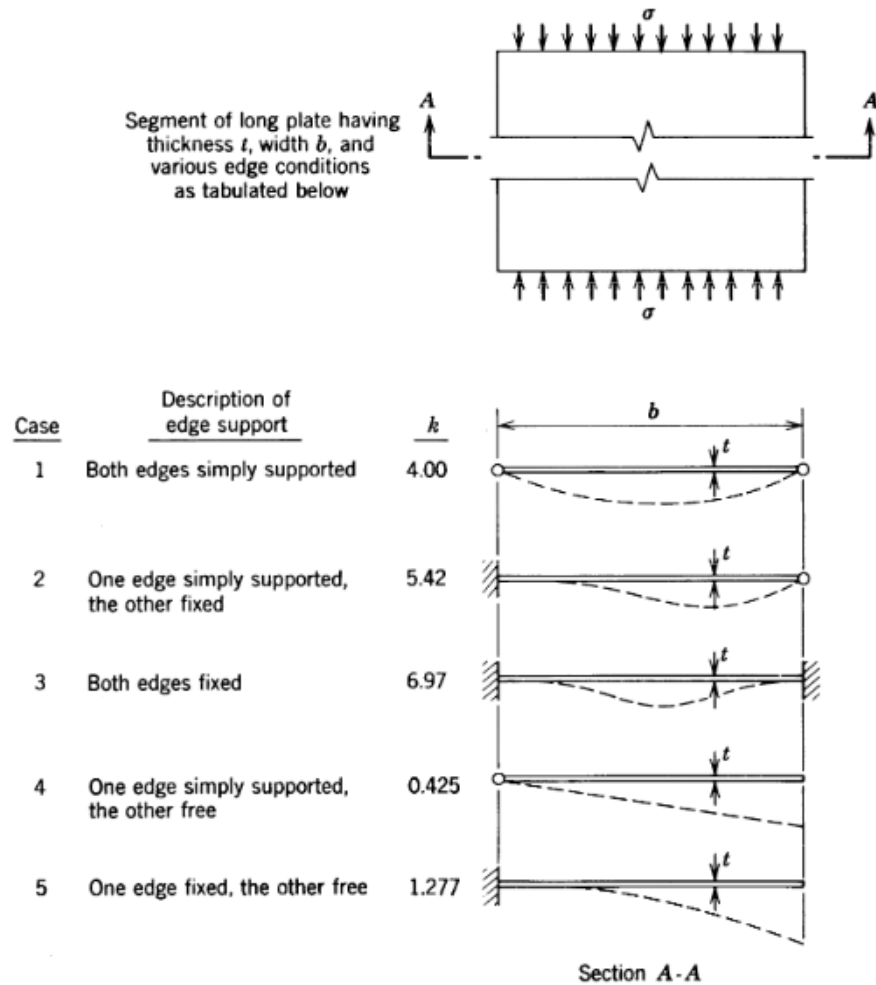


Figura 20 – Modo de encurvadura para placas muito longas com diferentes condições de fronteira, [18].

2.7 Estado da Arte

A utilização de vigas com aberturas na alma teve sua popularização durante a Segunda Guerra Mundial devido ao custo do aço. A possibilidade de incremento na rigidez dos elementos era vista com bons olhos pelos projetistas. Entretanto, estudos seguros sobre o comportamento dessas vigas só foram acontecer anos mais tarde. Os primeiros ensaios destrutivos realizados em grande escala em vigas alveolares aconteceram em 1988 na Universidade de Bradford com supervisão do Instituto de Construções em Aço (SCI). O objetivo era analisar com vigor a integridade estrutural da viga e determinar critérios de projeto, [1].

Não satisfeito com a quantidade de material disponível na literatura, bem como sobre os resultados obtidos, Grilo et al, [5], realizou uma série de estudos numéricos e laboratoriais sobre o comportamento estrutural das vigas alveolares, especialmente estudando o fenômeno de perda de estabilidade da viga chamado de encurvatura do montante da alma. Neste trabalho, foi proposto uma abordagem mais precisa para a determinação da resistência ao cisalhamento das vigas, mas igualmente de acordo com as normas vigentes. O procedimento fez o uso de 597 modelos numéricos, 14 vigas alveolares em escala real com diferentes configurações de geometria e contou com 1948 análises numéricas, [5].

Este modo de falha é independente do comprimento da viga, facilitando o estudo pois permitiu o uso de vigas curtas. O principal esforço responsável pela instabilidade é a força horizontal de corte agindo no montante da alma, ainda, a falha é bastante influenciada por defeitos no processo de fabricação. Durante o procedimento de ensaio, estas vigas foram simplesmente apoiadas em suas extremidades, não limitando o deslocamento no sentido longitudinal. A carga de prova foi aplicada na flange superior usando mecanismo hidráulico com controle de deslocamento. Ainda, foi usado um aparato extra para bloquear a deformação no sentido transversal, prevenindo a falha por encurvatura lateral torsional. Foram usados 9 modelos em escala real para calibrar os modelos numéricos e quando a proposta foi comparada com os resultados numéricos, as diferenças ficaram em torno de 5% [5].

No trabalho desenvolvido por Ferreira et al, [13], a ideia central era analisar a resistência a encurvadura lateral torsional de vigas alveolares variando a distribuição da tensão residual ao fim do processo de fabricação da viga. As análises não lineares geométricas e de material foram executadas usando o *Software* ABAQUS 6.12. As vigas ensaiadas foram submetidas à flexão uniforme, à uma carga concentrada central e à uma distribuição uniforme de carga. Cada configuração de esforços foi aplicada isoladamente na viga. Após a obtenção dos resultados, estes foram comparados a normas internacionais, resultados analíticos e com a possível atualização do Eurocódigo 3, a qual deverá considerar que o fator de imperfeição é função do módulo elástico da secção e das imperfeições do material. Verificou-se que a atualização proposta é precisa e conservadora para as vigas alveolares em regime elástico e inelástico, porém exige que as instabilidades geradas pelo mecanismo de Vierendeel e encurvadura do montante da alma devem ser verificadas primeiro para vigas curtas, [13].

Durante o processo de fabricação das vigas alveolares, grandes quantidades de calor são adicionadas ao perfil em duas etapas distintas. Inicialmente devido ao corte da alma da viga, normalmente realizado por plasma ou oxicorte, sendo estes procedimentos térmicos de corte. Em uma segunda etapa, a soldadura das partes cortadas provoca novamente uma grande introdução de calor no material. Essas tensões residuais são extremamente importantes para a determinação da capacidade resistiva do perfil estrutural. Entretanto, ainda não há um estudo que quantifique com precisão a influência da tensão residual no comportamento das vigas alveolares, [14].

Com isso, Sonck et al, [14], realizou um estudo sobre a encurvatura lateral torsional usando modelos numéricos e posteriormente feita a verificação experimental levando em consideração tensões residuais do processo de fabricação. O ensaio foi feito usando um mecanismo hidráulico para aplicação da força em dois pontos na viga; foi permitido o deslocamento transversal do perfil, pois este foi apoiado em roletes e o mecanismo de aplicação da força era livre para mover-se transversalmente também. Mediu-se a carga aplicada constantemente e uma série de transdutores revelaram os deslocamentos e deformações nos pontos desejados. Explorado na literatura pela primeira vez, provou-se que as alterações na tensão residual do processo de fabricação influenciam na capacidade resistiva das vigas alveolares.

Chung et al, [11], realizou um importante estudo sobre o mecanismo de Vierendeel de forma analítica e numérica. Este mecanismo é definido como uma instabilidade gerada pelo esforço de cisalhamento. A falha se inicia com o desenvolvimento de quatro rótulas plásticas em torno de um dos furos da viga. Entretanto, o atual método de dimensionamento de vigas alveolares considera que ocorre a falha quando a dobradura é verificada na secção em Tê superior do lado de menor momento na viga. Essa consideração se mostrou bastante conservativa, uma vez que as análises por elementos finitos mostraram que a viga pode suportar elevações de carga até 10% do valor analítico, [11].

Há uma grande exploração na literatura do comportamento das vigas alveolares em regime elástico, porém é sentida a falta de respostas sobre seu comportamento plástico, modos de falha e interação entre esses modos, ou seja, quando a viga entra em colapso devido a mais de um mecanismo. Pela carência de estudos que guiassem o projeto de vigas alveolares sob essa perspectiva e buscando respostas, Ellobody et al, [19], realizou uma investigação sobre os modos combinados de falha, desenvolvendo um modelo de análise numérica não linear 3D no *software* ABAQUS capaz de fazer a interação entre esses variados

modos. Para isso, o modelo desenvolvido passou a levar em consideração as propriedades inelásticas do material da flange e da alma da viga, tensão residual de fabricação e imperfeições geométricas, [19].

Embora mais exploradas na literatura, os estudos sobre as vigas com aberturas hexagonais na alma não podem ser usados para vigas alveolares, pois apresentam comportamentos distintos. Com isso, Ellobody et al, [19], desenvolveu e analisou 120 modelos de vigas alveolares de aço de forma analítica, destacando os efeitos de variações de geometria da seção transversal, comprimento da viga, resistência do aço, índice de esbelteza e encurvatura do montante da alma. Os estudos mostraram que as vigas que vieram a colapsar devido a distorção e encurvatura da alma apresentaram um considerável decréscimo da carga suportada. Ainda, o uso de aços com elevada resistência proporcionou um aumento da carga de falha para vigas alveolares menos esbeltas. Os resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) foram comparados com a Norma Australiana para Vigas de Aço para vigas em situações de falha por encurvatura lateral. Verificou-se que a norma é conservativa para aços comuns falhando por encurvatura lateral; não conservativa para falha combinada de encurvatura lateral e encurvatura do montante da alma e bastante conservativa para aços de elevada resistência, [19].

Isolando um segmento da viga alveolar, têm-se exatamente um conjunto formado por três placas finas, duas representando os banzos e a outra, responsável pela união destes, representando a alma. Investigando os efeitos da introdução de uma abertura no comportamento desses elementos, Moen et al, [20], utilizou diversas configurações de aberturas e posicionamentos destas, demonstrando através do Método dos Elementos Finitos (MEF) que a presença de aberturas em placas podem causar modos de encurvadura elástica únicos, diminuindo ou aumentando a resistência do elemento conforme o formato e espaçamento destes.

A presença de furos em um membro estrutural normalmente complica sua análise, especialmente em placas finas onde encurvadura elástica e deformação estão intimamente relacionadas. Aberturas podem provocar modos de colapso únicos, com capacidade de influenciar a resposta carga-deformação. Para estudar melhor esta interação, em 2009, Moen et al, [20], analisou a influência da presença de furos em placas simplesmente apoiadas em quatro lados e em três lados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Como resultado, obteve equacionamento capaz de descrever o comportamento dessas placas com diferentes configurações de aberturas, posicionamento e espaçamento comuns em aplicações de

engenharia. A justificativa é a necessidade de uso de *softwares* comerciais de elementos finitos para a validação dos elementos de placas com aberturas, os quais nem sempre são acessíveis para a comunidade projetista.

Conforme estudo realizado por Lima et al, [21], muitas estruturas utilizadas na engenharia civil, aeronáutica e naval consiste em vigas formadas pela união de elementos de placas. Quando este elemento de placa é carregado por esforço compressivo, é possível deste perder suas características geométricas e estruturais quando a força é demasiada elevada, ocasionando um fenômeno de instabilidade chamado de encurvadura. A resistência à encurvadura pode ser aumentada com o uso de enrijecedores. A estratégia utilizada foi converter uma fração do volume da placa em enrijecedores, mantendo constante o volume total do elemento. Foram obtidos resultados próximos a 90% de aumento da carga de colapso resistente sem aumento da massa total da placa.

Investigando o uso de elementos de placas em estruturas de pontes, Haffar et al, [22], levantou questões sobre a modelação proposta pelo Eurocódigo 1993-1-5, [23], o qual trata em seu Anexo A sobre o uso de enrijecedores. Comparando os resultados deste anexo com a aplicação do método dos elementos finitos (MEF), os autores obtiveram resultados de resistência maiores pelo MEF quando comparados à norma.

De acordo com Selamet et al, [24], a alma de uma viga I é considerada um elemento enrijecido pois possui apoio em seus dois bordos (pelos banzos). Já um banzo, é um elemento não enrijecido, uma vez que possui uma extremidade apoiada pela alma e a outra livre. Quando estas secções estão carregadas por esforço de compressão ou momento fletor, é possível de ocorrer fenômeno de instabilidade conhecido como encurvadura, porém ainda após a encurvadura elástica, os elementos ainda podem suportar esforços. Este comportamento é chamado de resistência à pós encurvadura. Segundo os autores, décadas de estudo do comportamento de placas em temperatura ambiente levaram ao desenvolvimento de metodologias precisas de dimensionamento pelo AISC (*Specification for Structural Steel Buildings*). Porém, mesmo com a substituição do módulo de elasticidade e tensão de cedência adequadas, para temperaturas elevadas sua metodologia super-estima a capacidade de resistência dos elementos quando comparadas ao MEF, questionando a falta de pesquisa ainda nesta área.

Na Figura 21 são mostrados os resultados de distribuição de tensões de colapso obtidos para temperatura ambiente e temperatura de 400°C para alma e banzo. A partir da tensão atuando na secção analisada, é extraída uma tensão média, a qual é aplicada nos elementos.

A normalização desta tensão pela tensão de cedência do material é mostrada na sequência, para uma temperatura de 500°C onde a alma é chamada de “Case 1a” e banzo “Case 2a”. Por comparação, a secção transversal total é analisada, considerando alma e banzo, sendo o “Case 3”.

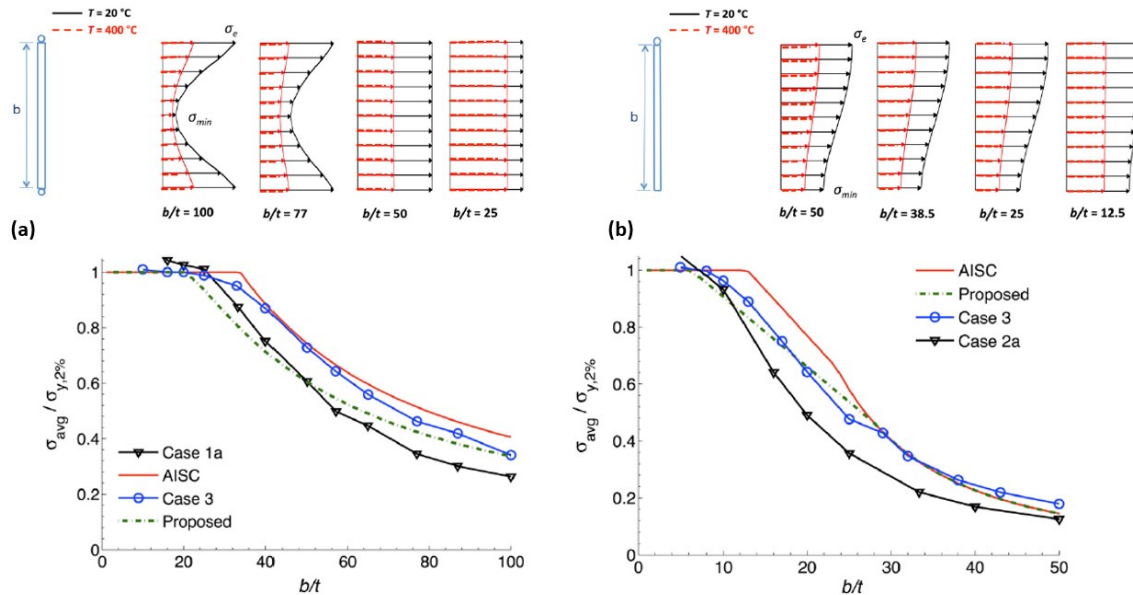


Figura 21 – Distribuição de tensões e comparação dos resultados para: a) alma e b) banzo, [24].

El-Sawy et al, [25], desenvolveram um importante trabalho sobre o comportamento elasto-plástico de elementos de placas com aberturas carregados por esforços compressivos. São analisados elementos quadrados e retangulares com abertura circular posicionada em diferentes configurações. O foco principal é no estudo de placas quadradas simplesmente apoiadas, sendo um estudo chave para o entendimento de placas retangulares. Atacando o parâmetro crucial para o dimensionamento desse tipo de elemento, foi estudado o modo de falha de acordo com a esbelteza da placa. Obteve-se como resultado uma diminuição da tensão crítica de encurvadura com o aumento da esbelteza do elemento, principalmente para menores diâmetros de aberturas. Da mesma forma, é nítida a obtenção de uma diminuição da tensão crítica conforme é aumentado o diâmetro da abertura. São mostrados alguns resultados na Figura 22 para o aço A36. A esbelteza geométrica é mantida constante e igual a 50 na Figura 22 – b.

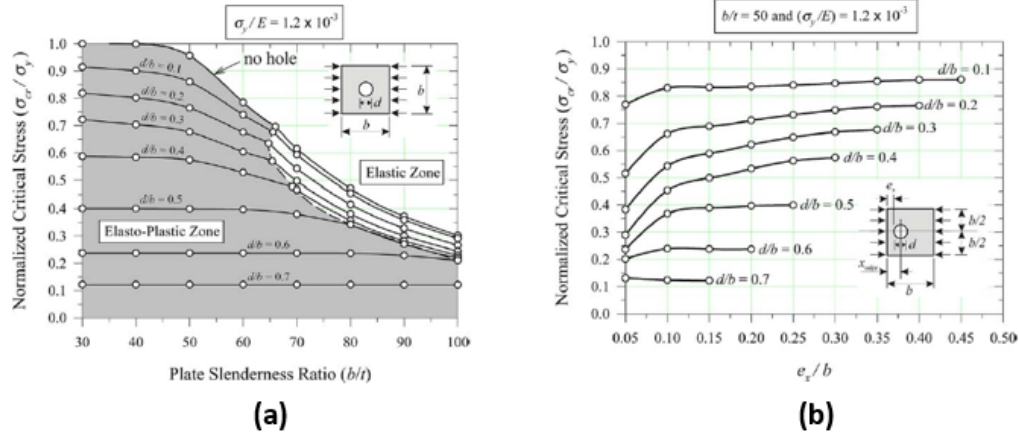


Figura 22 – a) Tensão crítica normalizada em função de: a) esbelteza geométrica e b) posicionamento da abertura, para vários diâmetros [25].

Conforme trabalho de Zhu et al, [15], a capacidade resistiva de vigas formadas por elementos de placa é bastante sensível a ocorrência de encurvadura local. Nesse sentido, secções transversais de elementos são classificadas em diferentes classes de acordo com a resistência dos elementos à encurvadura local, sendo um passo essencial e básico nos códigos de projeto. Os autores frisam a intensa interação existente entre alma e flange de um perfil I, fenômeno que influencia o comportamento da secção transversal e que normalmente não é levado em consideração na classificação. Ainda, não é analisada a estabilidade geral do membro, o que influencia diretamente na capacidade resistiva do perfil. Para embasar as afirmações, são realizadas simulações numéricas, as quais são experimentalmente verificadas e posteriormente conduzem estudos paramétricos. Levando as interações mencionadas em consideração, o objetivo consiste na obtenção de uma metodologia de classificação baseada na resistência normalizada do elemento, propondo atualização para os códigos chineses.

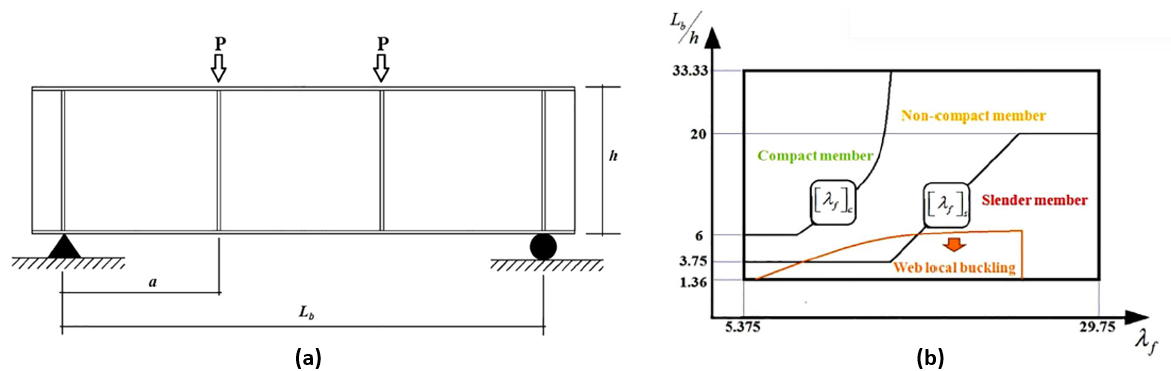


Figura 23 – a) Esquemático da viga ensaiada; b) Classificação proposta com base nos parâmetros estudados, [15].

Capítulo 3: Verificação de segurança de estruturas de aço

3.1 Introdução

A presença de aberturas na alma das vigas gera uma significativa mudança no método de análise se comparado a vigas sólidas. Há uma expressiva diminuição da resistência ao corte, uma vez que boa parte da alma pode ser removida. Todavia, quando se analisa a resistência à flexão, a redução não é tão expressiva para o caso de manutenção da altura original. Um importante aspecto a se observar, ainda, é se a furação da alma é feita de modo regular ou se apenas alguns furos isolados estão presentes, [6].

A utilização de vigas alveolares tem inúmeros benefícios, sendo uma ótima solução visando economia de material. Porém, é necessária atenção ao seu dimensionamento para evitar perdas humanas e de capital, [26]. A Figura 24 mostra a utilização de vigas alveolares em edifícios.



Figura 24 – Vigas alveolares funcionando como vigas e colunas em estruturas de edifícios, [27].

3.2 Dimensionamento de vigas sólidas e alveolares

Como já mencionado ao longo deste trabalho, a existência de aberturas na alma das vigas altera seu comportamento estrutural. Alguns modos de colapso são semelhantes ao de vigas sólidas, outros são exclusividade de vigas com aberturas na alma.

3.2.1 Resistência ao esforço de corte

Diz-se que uma viga resiste ao corte quando o esforço transversal aplicado satisfaz a seguinte relação:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (13)$$

Nesta relação, V_{Ed} representa o esforço transversal atuante e $V_{c,Rd}$ é o valor do esforço transversal resistente, [9].

O proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], traz em sua secção número 6 algumas expressões bastante importantes para o cálculo da capacidade resistiva das vigas alveolares. O fenômeno de colapso por corte da secção 2 Tê pode ser quantificado pela Equação (14):

$$V_{o,pl,Rd} = \left[V_{pl,Rd} - \frac{d_0 t_w f_y}{\sqrt{3}} \right] \quad (14)$$

Onde $V_{pl,Rd}$ representa a resistência plástica ao cisalhamento para uma secção transversal não perfurada. Seu método de determinação está disponível no Eurocódigo 3-1-1, 6.2.6, [9], e é mostrado na Equação (15). Ainda, tem-se que d_0 representa o diâmetro da abertura circular; t_w é a espessura da alma e f_y representa a tensão de cedência do material, [2].

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

$$A_v = A - 2b_f * t_f + (t_w + 2r)t_f \quad (16)$$

$$A_v = \eta * h_w t_w \quad (17)$$

Onde: f_y representa a tensão de cedência do aço e γ_{M0} é o fator parcial de segurança adimensional da secção do aço e será tratado como unitário. A área resistente ao esforço transversal A_v tem seu método de cálculo diferenciado para perfis laminados ou soldados. Para o primeiro caso, deve ser usada a equação que retorna o menor valor entre as expressões (16) e (17). A Equação (17) deve obrigatoriamente ser usada para determinar a área resistente ao corte para o caso de vigas soldadas, [9].

Ainda, A é a área da secção transversal do perfil sólido; ; b_f é a largura total do banzo; t_f é a espessura dos banzos e r representa o raio de concordância entre alma e banzo. Os parâmetros da secção transversal de uma viga alveolar são mostrados na Figura 25. O valor de η é definido pelo Eurocódigo 3-1-5, [23], e pode ser tratado como unitário de maneira conservativa, ou assumir o valor de 1.2, [9].

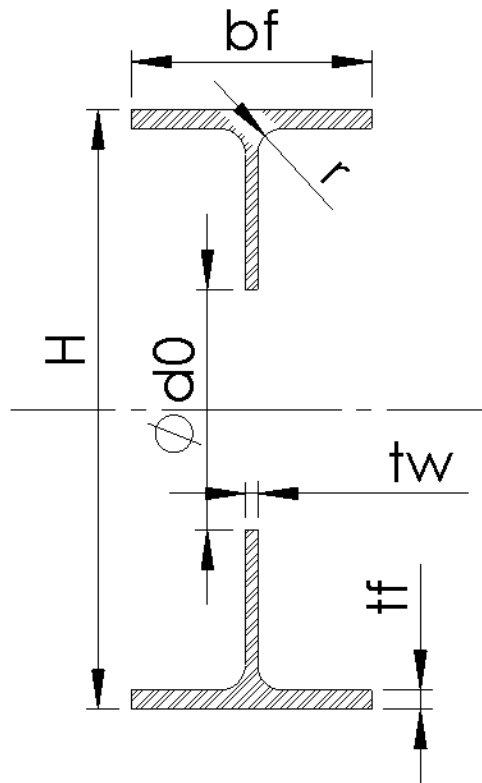


Figura 25 – Parâmetros da secção transversal de uma viga alveolar.

Quando as vigas são de classe 3, não se pode usar este método para determinação da resistência, sendo necessária uma análise elástica. Isso se dá ao fato de que classes 3 e 4 não são capazes de formar rótulas plásticas. Para tal, a verificação a seguir é necessária:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y/(\sqrt{3} * \gamma_{M0})} \leq 1.0 \quad (18)$$

Cabe ressaltar que esta é uma análise conservativa pois não leva em consideração a distribuição plástica parcial das tensões tangenciais. O valor de τ_{Ed} pode ser obtido de acordo com a equação (19), onde S_e representa o momento estático em relação ao eixo principal, I o momento de inércia da secção e t a espessura da secção no ponto analisado.

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} * S_e}{I * t} \quad (19)$$

O SCI (Steel Construction Institute), [6], traz um método semelhante para este cálculo. Efetivamente, a área resistente ao corte em uma viga alveolar é a soma das áreas dos dois Tês, superior e inferior. Para o caso de viga simétrica, esta área é a mesma. Com isso, a retorna o valor da resistência ao cisalhamento de uma viga perfurada conforme a Equação (20).

$$V_{o,pl,Rd} = \frac{2 * A_{v,T} * (f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (20)$$

Onde $A_{v,T}$ é a área de um Tê e, pela diferenciação entre secções laminadas e soldadas conforme a Figura 26, $A_{v,T}$ deve ser calculado da seguinte forma:

Secção laminada:

$$A_{v,T} = A - b_f t_f + (2 * r + t_w) * 0.5 t_f \quad (21)$$

Secção soldada:

$$A_{v,T} = t_w (h_{w,T} - 0.5 t_f) \quad (22)$$

Onde $h_{w,T}$ é o comprimento da secção em Tê; t_f a espessura da flange; b_f a largura da flange.

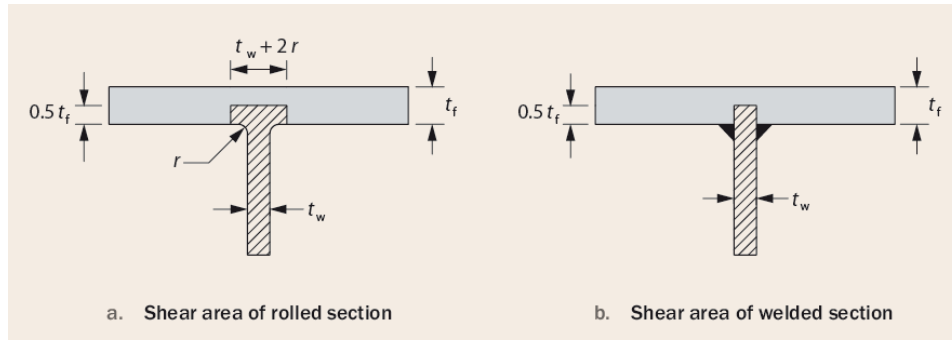


Figura 26 – Área de resistência ao corte para: a. Secções laminadas e b. Secções soldadas, [6].

Ainda, o SCI (*Steel Construction Institute*), [6], traz um método que permite o cálculo do esforço cortante agindo no sentido longitudinal no montante da alma entre dois furos adjacentes, conforme mostrado na Figura 27, quantificado pela Equação (23).

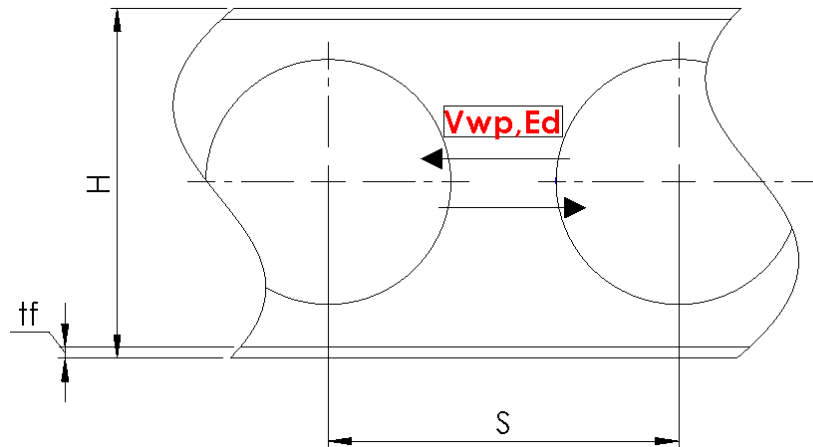


Figura 27 – Força de corte atuando longitudinalmente no montante de alma.

$$V_{wp,Ed} = \frac{V_{Ed}S}{(h_{eff} + z_t)} \quad (23)$$

Onde: V_{Ed} é valor da força de média de corte agindo na viga na direção de aberturas adjacentes; S é a distância entre centros dos furos; h_{eff} se refere a distância entre os centroides dos Tês superior e inferior; z_t é a distância entre o centroide do Tê superior até o ponto mais externo da flange.

A resistência ao corte do montante da alma, pode ser calculada conforme a Equação (24), onde w representa a largura do montante da alma, obtido por: $w = S - d_0$.

$$V_{wp,Rd} = \frac{(w * t) * (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (24)$$

3.2.2 Resistência ao momento fletor

A determinação da resistência ao momento fletor para as vigas alveolares é similar às vigas sólidas. Para quantificar resultados, tem-se as expressões a seguir de acordo com sua classe de secção transversal, tendo que sempre satisfazer a relação (25), onde M_{Ed} é o momento fletor atuando na secção e $M_{c,Rd}$ é o momento resistente. Essas expressões são usadas comumente para as vigas sólidas, porém podem também ser usadas para as vigas alveolares. Efetivamente, é alterado o valor do módulo plástico ou elástico, W_{pl} e W_{el} respectivamente, os quais devem ser calculados para o tipo de secção transversal analisada e capacidade resistiva (plástica ou elástica) de acordo com sua classificação, [2].

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (25)$$

Classe 1 ou 2:
$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (26)$$

Classe 3:
$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (27)$$

Onde W_{el} representa o módulo elástico da secção, [9].

Ainda, a resistência das vigas alveolares ao momento fletor pode ser calculado de acordo com o SCI (*Steel Construction Institute*), [6]. Esta instituição reitera a necessidade de a verificação de segurança ser feita na direção da abertura, onde efetivamente tem-se uma secção 2-Tê. Para tal, são introduzidas as Equações (28) e (29), as quais retornam a resistência plástica e elástica, respectivamente, para um dos Tês, superior ou inferior, [6].

Deve-se ter atenção ao fato que as expressões transcritas apenas se aplicam em casos de não existência de carregamento axial perf, [6].

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{wt} * f_y (0.5h_{wt} + t_f - z_{pl})}{\gamma_{M0}} + \frac{A_{wt} * f_y (0.5h_f - z_{pl} + z_{pl}^2/t_f)}{\gamma_{M0}} \quad (28)$$

Os termos ainda não definidos são: h_{wt} , o qual representa a altura da alma do Tê; $z_{pl} = (A_f + A_{wt})/2b_f$, o qual retorna o valor da distância entre o eixo plástico neutro de um Tê e a fibra externa da flange. Tem-se ainda a área da secção transversal da alma de um Tê $A_{wt} = h_{wt} * t_w$. As tensões atuantes nesta secção transversal são mostradas na Figura 28, indicados os parâmetros.

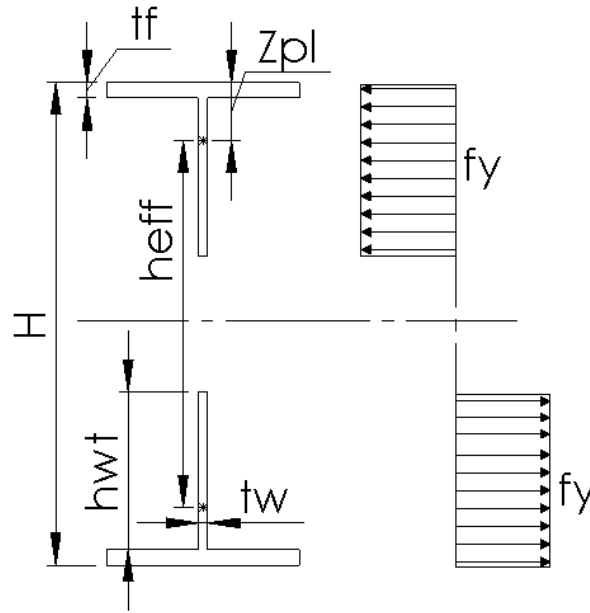


Figura 28 – Tensões no regime plástico atuantes na secção de uma viga alveolar, indicados parâmetros.

As expressões anteriores apenas aplicam-se para secções de classe 1 e 2, uma vez que remere à resistência plástica. Quando a secção é de classe 3, é exigida uma verificação elástica, uma vez que não esta não permite a formação de rótulas plásticas. Para tal, a Equação (29) quantifica o valor do momento elástico resistente de 1-Tê da viga alveolar, [6]. É mostrado na Figura 29 a distribuição elástica de tensões em uma secção transversal de viga alveolar, indicados os parâmetros.

$$M_{el,Rd} = \frac{A_{wt}f_y(0.5h_{wt} + t_f - z_{el})^2 + A_f f_y(z_{el} - 0.5t_f)}{h_{wt} + t_f - z_{el}} \quad (29)$$

A_f faz referência à área da flange; Z_{el} representa a distância entre o centroide elástico do Tê e a fibra externa da flange e é calculado da seguinte maneira:

$$z_{el} = \frac{A_{wt}(0.5h_{wt} + t_f) + 0.5 * A_f t_f}{A_f + A_{wt}} \quad (30)$$

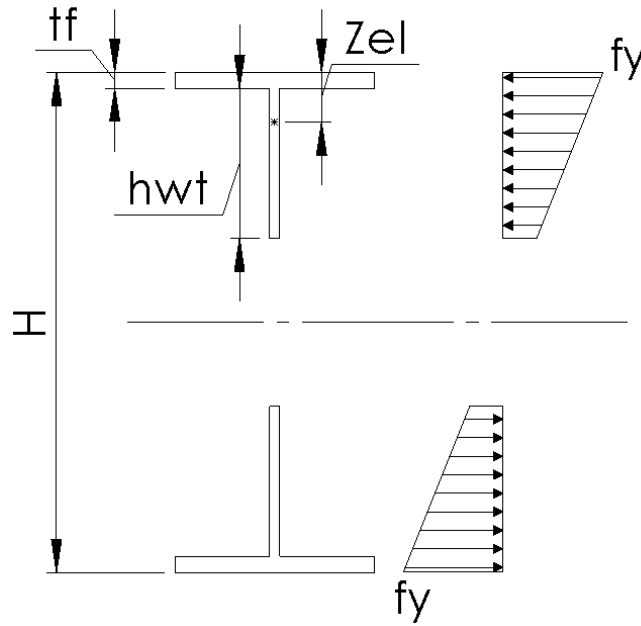


Figura 29 – Distribuição elástica de tensões na secção transversal da viga alveolar.

Ainda de acordo com o SCI, [6], em sua cláusula 3.2.2, é possível determinar a resistência plástica ao momento fletor na linha central da abertura de acordo com a equilíbrio das forças internas, descrito pela Equação (31).

$$M_{pl,Rd} = N_{bT,Rd} * h_{eff} \quad (31)$$

Onde $N_{bT,Rd}$ representa o esforço normal resistente do Tê inferior, calculado de acordo com a Equação (32) e h_{eff} é a distância entre os centroides dos Tês superior e inferior.

$$N_{bT,Rd} = A_{bT} * f_y \quad (32)$$

A_{bT} significa a área do Tê inferior.

3.2.3 Resistência das secções Tê

Efetivamente, para um carregamento localizado na parte superior da viga, pode-se dizer que o Tê inferior está sujeito a uma tensão de tração, enquanto o Tê superior é carregado por esforço compressivo. Sua resistência plástica desses pode ser calculada, então, pela Equação (33):

$$N_{pl,Rd,T} = \frac{A_{v,T} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (33)$$

Onde $A_{v,T}$ representa a área da secção transversal do Tê e γ_{M0} é o fator parcial de segurança, normalmente tratado como unitário, [9].

A resistência das secções Tê é dependente de muitos fatores. Quando a viga está sujeita à momento fletor global e também por esforço axial, é necessário levar em consideração à redução da capacidade resistiva dos Tês. Para tal, a presença de esforços de tração e compressão altera a resistência plástica ao momento fletor de acordo com a Equação (34).

$$M_{N,pl,Rd} = M_{pl,Rd} * \left(1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right) \quad (34)$$

Definindo algumas particularidades de acordo com a classe das secções, tem-se como referência as seguintes variáveis: $M_{N,pl,Rd}$ representa a capacidade resistiva reduzida da secções Tê devido a presença de forças axiais; $N_{pl,Rd}$ representa a resistência plástica à esforço axial dos Tês; N_{Ed} é a força axial de tração ou compressão agindo na viga, [2].

3.2.4 Resistência ao mecanismo de Vierendeel

A proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], traz um método alternativo para cálculo da resistência em relação ao momento de Vierendeel que pode ser aplicado apenas à vigas com aberturas circulares na alma e que tenham sido fabricadas por laminação à quente. As características geométricas são mostradas na Figura 30.

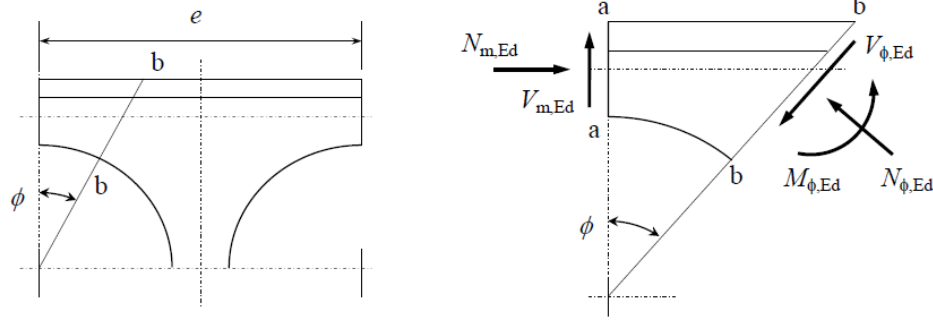


Figura 30 – Forças e momentos agindo na secção crítica em torno da abertura, [2].

As solicitações presentes na secção b-b devem ser verificadas para efeitos da ocorrência do mecanismo de Vierendeel. O ângulo crítico para a ocorrência do Mecanismo de Vierendeel, ϕ , pode ser determinado com incrementos de 5° . Neste ângulo encontrado, deverá ser analisado o comportamento de equilíbrio de forças e momentos internos, de modo a atingir o equilíbrio do elemento. Para tal, deve ser satisfeita a Equação (35).

$$\frac{N_{\phi,Ed}}{N_{\phi,Rd}} + \frac{M_{\phi,Ed}}{M_{\phi,Rd}} \leq 1 \quad (35)$$

Onde, $N_{\phi,Ed}$ representa a força axial perpendicular a secção b-b; $N_{\phi,Rd}$ representa a resistência ao esforço axial na secção b-b; $M_{\phi,Ed}$ é o momento fletor agindo na secção b-b e $M_{\phi,Rd}$ é a resistência ao momento fletor nesta mesma secção, [2].

É sugerido que uma primeira iteração pode ser iniciada com 25° e recomenda-se que os incrementos sejam feitos também de 5° em 5° . Quando é requerida uma maior precisão, podem ser usados incrementos de 1° , [28].

3.2.5 Encurvadura local do montante da alma

A encurvadura do montante da alma é um exemplo de fenômeno de perda de estabilidade bastante complexo, o qual depende de alguns parâmetros geométricos da viga como forma da abertura, esbelteza da alma e a existência de assimetria entre os Tês superior e inferior.

Há diferenças de abordagem conforme o espaçamento entre as aberturas e inicialmente é tratado o caso em que as aberturas são consideradas amplamente espaçadas. A definição

para essa classificação é de a largura do montante da alma ser superior ao diâmetro da abertura, para o caso de um furo circular. Nesta situação, o comprimento de encurvatura da alma é $l_w = 0.7d_0$. Nesta linha, tem-se as relações trazidas pelo SCI (Steel Construction Institute), [6], onde a Equação (36) representa o fator adimensional de esbelteza para a alma da viga, necessário para a determinação do fator de redução da resistência à encurvatura χ , mostrado na Equação (37), [6].

$$\bar{\lambda} = \frac{2.5d_0}{t} * \frac{1}{\lambda_1} \quad (36)$$

Seguindo o Eurocódigo 3 - 1993-1-1 §6.3.1.3, [9] onde:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 94\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

De acordo com o SCI, [6], é recomendado que seja utilizada a curva de encurvadura “b”. Para cada curva de encurvadura, há um coeficiente de redução α relacionado, como mostrado na Tabela 3.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (37)$$

Onde: $\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$

Tabela 2 – Fatores de imperfeição, [9]

Curva de Encurvadura	a	b	c	d
Factor de imperfeição α	0.21	0.34	0.49	0.76

Por fim, a expressão (38) retorna a resistência à encurvatura do montante da alma:

$$N_{wp,Rd} = \chi * \frac{0.5wt_w f_y}{\gamma_{M1}} \quad (38)$$

Onde w representa a largura do montante da alma. Para o caso de as aberturas circulares ou alongadas estarem configuradas de modo mais próximo, a abordagem muda. Para este caso, o comprimento efetivo de encurvatura é $l_w = 0.5\sqrt{(w^2 + d_0^2)}$. O fator de esbelteza normalizado da alma da viga é calculado pela Equação (39) e os fatores mencionados anteriormente podem ser obtidos da maneira já descrita, [2].

$$\bar{\lambda} = 1.75 * \frac{\sqrt{w^2 + d_0^2}}{t} * \frac{1}{\lambda_1} \quad (39)$$

Desta maneira, a resistência à encurvatura do montante de alma agora é dada pela Equação (40).

$$N_{wp,Rd} = \chi * \frac{w t_w f_y}{\gamma_{M1}} \quad (40)$$

3.2.6 Encurvatura lateral torsional

É possível que as vigas alveolares estejam fixadas de maneiras distintas enquanto formam a estrutura desejada. Essas fixações podem restringir a deformação do perfil em algumas direções. Para o cálculo da resistência à encurvatura lateral torsional, porém, será considerado o caso de uma viga classe 1 e 2 com deslocamento lateral não restringido. Nestas condições, o momento fletor crítico é dado pela Equação (41), [2].

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (41)$$

W_y refere-se à $W_{pl,y}$ para as secções tipo 1 e 2. O Subíndice y indica que o módulo plástico a ser usado é em relação ao eixo fraco. O termo χ_{LT} significa o coeficiente de redução para a resistência à encurvatura lateral e sua determinação é feita pela Equação (42) para o caso geral.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (42)$$

Onde

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (43)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_y f_y}{M_{cri}}} \quad (44)$$

Onde $\bar{\lambda}_{LT}$ é o fator adimensional de esbelteza para a encurvatura lateral torsional e M_{cri} é o momento crítico elástico para encurvadura lateral torsional.

A escolha da curva de encurvadura adequada deve ser feita consultando a Tabela 3.

Tabela 3 – Curvas de encurvadura para o caso geral, [9].

Secção Transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b_f \leq 2$	a
	$h/b_f > 2$	b
Secções em I soldadas	$h/b_f \leq 2$	c
	$h/b_f > 2$	d

3.2.6.1 Momento crítico elástico

Para membros estruturais sujeitos a flexão em relação a seu eixo forte, com configuração da secção transversal simétrica em relação à este eixo, o momento crítico elástico pode ser obtido pela Equação (45), [29].

$$M_{cri} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L_v)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L_v)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (45)$$

Onde C_1 e C_2 são coeficientes que dependem das condições de carregamento e suporte. Alguns exemplos são mostrados na Figura 31. L_v o comprimento da viga, I_z o momento de inércia em relação ao eixo fraco, I_w a constante de empenamento e I_T constante de torção.

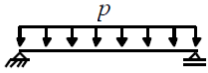

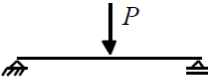

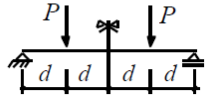
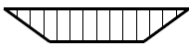
Loading and support conditions	Diagram of moments	k_z	C_1	C_2	C_3
		1.0 0.5	1.12 0.97	0.45 0.36	0.525 0.478
		1.0 0.5	1.35 1.05	0.59 0.48	0.411 0.338
		1.0 0.5	1.04 0.95	0.42 0.31	0.562 0.539

Figura 31 – Coeficientes para viga com carregamento transversal, [29].

Ainda, k_z e k_w são fatores de comprimeto efetivo, dependendo das condições de contorno. Podem ser, de maneira conservativa, assumidos como unitários. z_g é a distância entre o ponto de aplicação da força e o centro geométrico; G é o módulo de cisalhamento, dado por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Sendo ν o coeficiente de Poisson.

3.3 Aplicação da metodologia de dimensionamento

Após a escolha da secção a ser analisada, a classificação desta é um passo primordial. Levando em consideração as recomendações do Eurocódigo 3 para a classificação de secções transversais de vigas alveolares trazidas no item 2.4.1.1, são escolhidos dois perfis com base na classe de seu banzo: IPE500 e HEA300. O primeiro possui banzo de classe 1 e o segundo de classe 3, ambos tendo suas principais dimensões geométricas mostradas na Tabela 4. Conforme as recomendações da proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], quando o banzo da viga alveolar for de classe 1 ou 2, o comprimento da alma do Tê (h_{wt}), caso superior, deve ser reduzido para o valor limite da classe 2, sendo $h_{wt} = 10\epsilon t_w$. O mesmo se aplica para banzos de classe 3, onde a recomendação é que seja diminuída a alma do Tê para o valor limite da classe 3, caso este comprimento seja superior. Para tal, o valor máximo será $h_{wt} = 14\epsilon t_w$.

Percebe-se que uma parte do material é ignorada no dimensionamento da estrutura, gerando dúvidas sobre as consequências desta consideração. Para quantificar os resultados, é analisado o momento plástico resistente da secção 2-Tê, aplicando a metodologia de classificação proposta para a viga IPE500. Este parâmetro é normalizado pelo momento plástico resistente de uma viga equivalente sólida em função do rácio entre diâmetro da abertura e altura da viga, sendo mostrado na Figura 32. Este processo é repetido para secções transversais compreendidas entre $1 \leq H/h \leq 1,5$. Onde H representa a altura da viga alveolar e h a altura da viga que deu origem à viga alveolar. O mesmo procedimento é feito para a secção HEA300, porém como a secção transversal é de classe 3, o momento resistente da secção 2-Tê e sólida é o momento resistente elástico. Os resultados são mostrados na Figura 33.

Tabela 4 – Dimensões das vigas IPE500 e HEA300.

Parâmetro	Medida (mm)	
	IPE500	HEA300
Altura - H	500	290
Espessura do banzo - t_f	16	14
Espessura da alma - t_w	10,2	8,5
Raio de concordância - r	21	27
Largura do Banzo - b_f	200	300

Pode-se perceber com nitidez um patamar linear para diâmetros menores, principalmente para o regime plástico. Este patamar ocorre quando o diâmetro da abertura é pequeno, de forma que o comprimento do Tê é superior ao comprimento limite estipulado para a classe do banzo. Desta forma, o momento resistente da secção 2-Tê se mantém constante até o diâmetro aumentar de forma à alma do Tê ser menor ao limite estipulado, ocasião em que ocorre um rápido decrescimento. Na Figura 34 é mostrado o comprimento real da alma do Tê, representado pela dimensão c e a imposição de diminuição de comprimento dado pelo Eurocódigo 3, chamada de lim .

A aplicação da metodologia de classificação proposta no Eurocódigo 3 provoca um comportamento específico na resistência das vigas alveolares. Ao longo do presente trabalho

será proposta uma nova metodologia de classificação, buscando reduzir a sub-estimação da resistência das vigas alveolares.

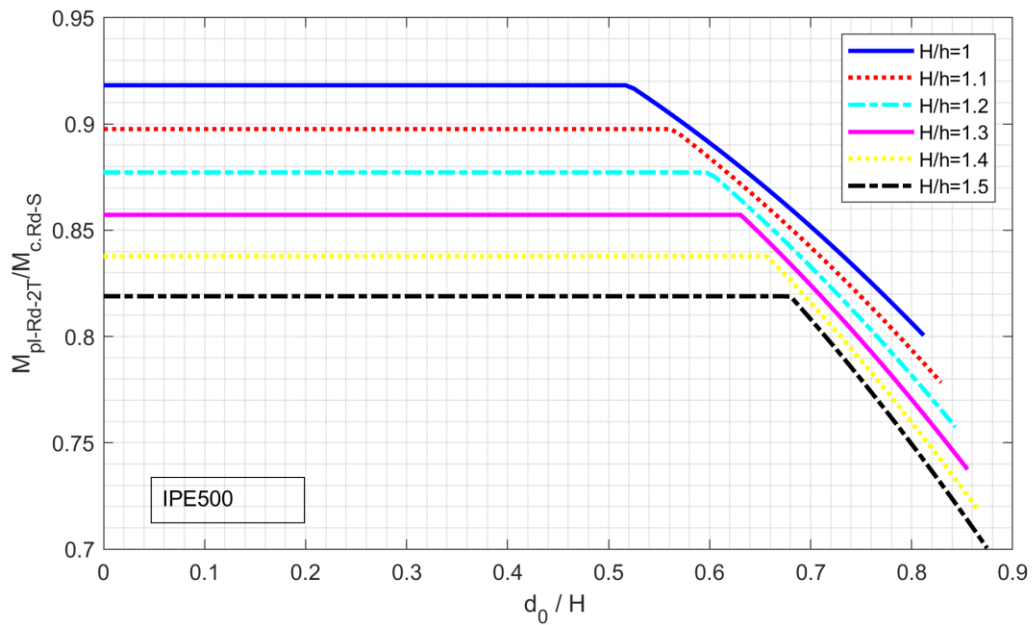


Figura 32 - Momento resistente plástico normalizado de uma secção de classe 2 aplicando as condições de classificação propostas pelo EC3.

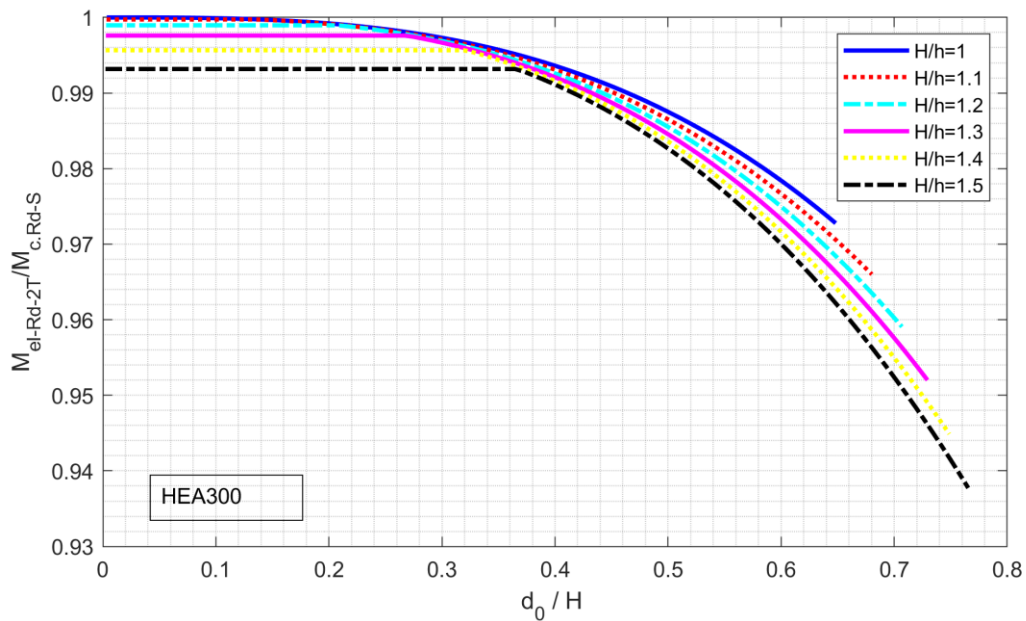


Figura 33 – Momento resistente elástico normalizado de uma secção de classe 3 aplicando as condições de classificação propostas pelo EC3.

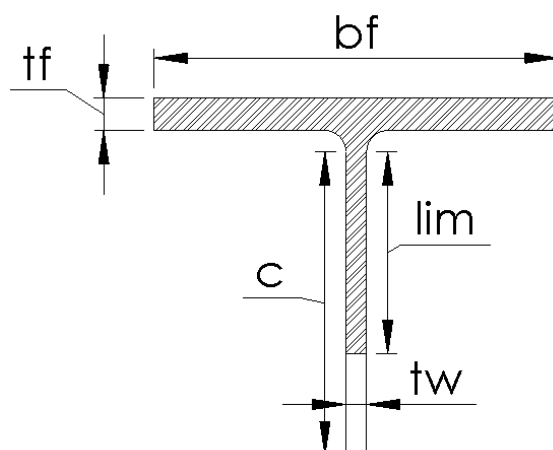


Figura 34 – Representação da condição para classificação proposta pelo Eurocódigo 3.

Capítulo 4: Análise numérica da encurvadura linear elástica

4.1 Introdução

Elementos caracterizados como placas finas são usadas em várias estruturas; podem fazer parte de uma estrutura complexa ou mesmo desempenhar a função de elementos principais. Exemplos de elementos de placas podem ser as paredes de containers, reservatórios, elementos finos de automóveis ou aviões, etc. Na engenharia civil, podem ser citados exemplos como almas e banzos de vigas, [30].

Muitos perfis estruturais de aço são formados pela montagem de elementos planos, os quais são rigidamente conectados ao longo de suas fronteiras comuns. A análise de encurvadura local desses perfis pode ser executada considerando que a condição de fronteira entre os elementos é próxima a uma união articulada. Resultado dessa consideração é que um elemento de placa pode ser tratado como simplesmente apoiado ao longo da fronteira ou das fronteiras em comum e livre ao longo das bordas não conectadas, [26].

4.2 Método dos elementos finitos

O Método Dos Elementos Finitos (MEF) foi desenvolvido como uma chave para a resolução de muitos problemas avançados de engenharia. Inicialmente, seu uso era restrito a problemas de análise estrutural de tensões, sendo posteriormente estendido para outros campos, como térmico, elétrico e fluidodinâmico. Basicamente, pode-se dizer que o MEF calcula o campo de distribuição de uma determinada variável ao longo de um domínio, [31].

Seu funcionamento é baseado na divisão do domínio de um problema complexo em muitos elementos (discretização), sendo as leis da física aplicadas em cada pequeno elemento, os quais normalmente tem uma geometria bastante simples com solução

conhecida. O Método dos Elementos Finitos (MEF) se tornou uma ferramenta bastante sofisticada para modelamento, simulação, análise e testes, permitindo ajustes que garantam a funcionalidade dos componentes ou estruturas antes da sua fabricação, [31].

É importante frisar as diferenças entre o modelo analítico e numérico. O primeiro usa o desenvolvimento matemático para encontrar a solução geral e exata de um problema. A grande limitação existente é que a solução geral só é conhecida para um conjunto muito reduzido de casos, normalmente expressando uma aproximação bastante distante do problema real. Já a análise numérica permite a resolução de problemas mais complexos, uma vez que cria um conjunto numérico com equações matemáticas não lineares que governam o problema. A estratégia é transformar essas expressões matemáticas em um conjunto de equações algébricas que dependem de um número finito de parâmetros. Ao final da análise, tem-se o problema real descrito em função de milhares ou até milhões de incógnitas organizadas em um sistema algébrico de equações que só pode ser resolvido com o uso de ferramentas computacionais. Isso explica porque, embora o método seja conhecido há muitos anos, sua popularização apenas se deu no Século XX, conforme eram criados computadores mais modernos e com maior capacidade de processamento, [32].

4.2.1 Elemento de casca SHELL181

Elementos de casca são utilizados no Método dos Elementos Finitos (MEF) para criar uma idealização matemática em duas dimensões de uma estrutura tridimensional. Descrever um domínio 3D com elementos de casca apresenta vantagens sobre a utilização de elementos sólidos principalmente no quesito eficiência computacional. Embora existam vários elementos de casca, a escolha do SHELL181 para a execução das análises pretendidas se deu pelo fato deste fornecer capacidade de análise não linear mais robusta, bem como melhor descrição dos dados da secção transversal, na sua análise e também visualização. É mostrada na Figura 35 o elemento citado. Ainda, cabe-se ressaltar que este elemento possui 4 nós, com 6 graus de liberdade cada nó, fornecendo uma completa capacidade de análise não linear incluindo grandes deslocamentos, [33].

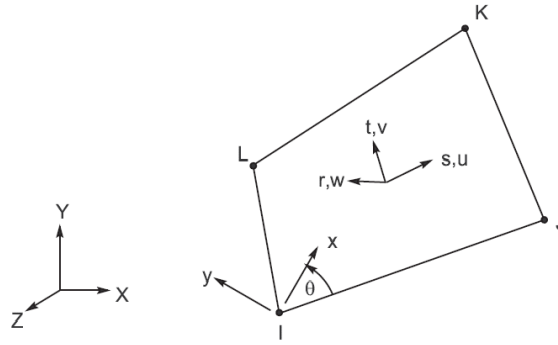


Figura 35 – Elemento de casca SHELL181, [33].

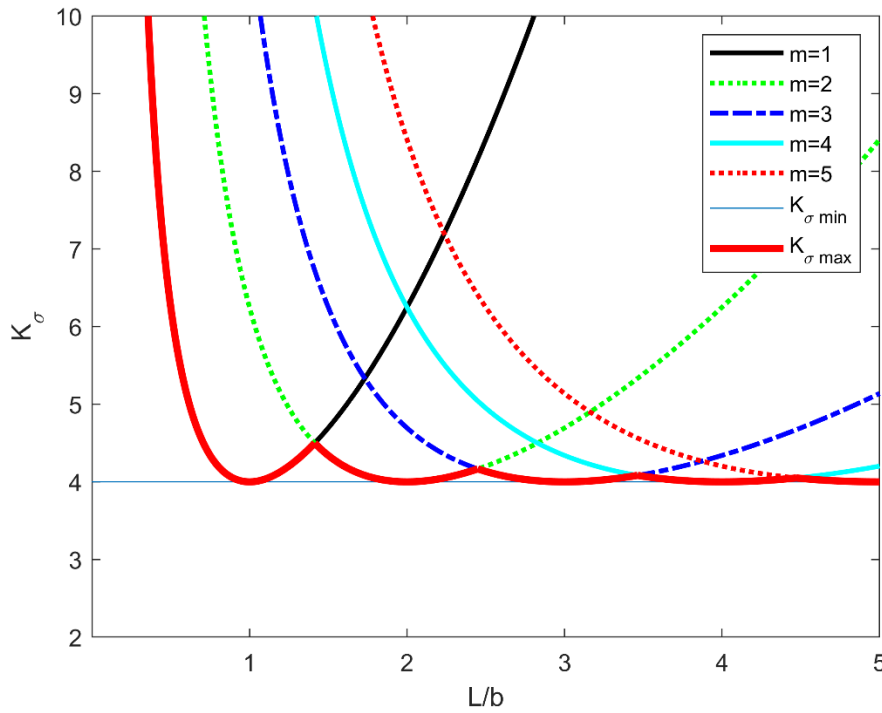
4.3 Encurvadura elástica de placas sólidas

Conforme o tratamento dado pelas normas europeias, uma viga I pode ser separada em placas finas e ter sua resistência à encurvadura analisada de maneira independente entre seus elementos. A diferenciação entre elementos internos e externos é representada por diferentes condições de fronteira. A alma de uma viga é considerada um elemento interno, uma vez considerada conexão articulada com os banzos. Nesse sentido, um banzo é considerado um elemento externo, uma vez que, embora uma de suas extremidades seja representada por uma conexão articulada com a alma, a outra extremidade é livre. Essas diferentes condições de fronteira impactam diretamente no coeficiente de encurvadura k_σ , uma vez que não podem ser considerados apenas casos de placas muito longas. Assim, são desenvolvidos os modelos matemáticos representativos de seus comportamentos para os casos de estudo, inicialmente se detendo à viga sólida e posteriormente expandindo para a viga alveolar. Cabe lembrar que as diferentes condições de fronteira se aplicam nas duas linhas no sentido longitudinal da placa, sendo as duas demais sempre consideradas apoiadas.

O caso de placa duplamente apoiada, também chamada por elemento interno, tem coeficiente de encurvadura k_σ regido pela Equação (46), o qual tem sua plotagem mostrado na Figura 36 para vários valores de semi ondas no sentido longitudinal ao elemento, [16].

$$k_\sigma = \left(\frac{mb}{L} + \frac{L}{mb} \right)^2 \quad (46)$$

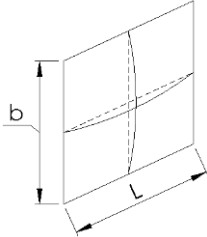
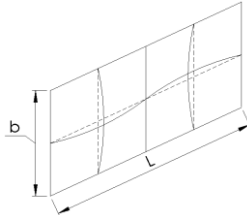
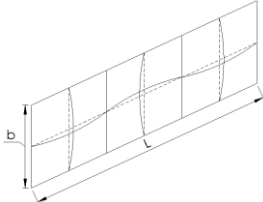
Onde L representa o comprimento da placa, b a largura da placa e m é o número de semi-ondas, mostrado na Tabela 5, de acordo com a razão L/b .


 Figura 36 – Coeficiente de encurvadura k_σ de placas sólidas – elemento interno.

Analisando a figura precedente, percebe-se que a conforme aumenta a razão entre comprimento e largura da placa, o coeficiente de encurvadura tem um comportamento mais suavizado, tendo seu valor máximo representado pela curva contínua em vermelho, ao mesmo tempo que aumenta o número de semi-ondas. Embora grande parte dos trabalhos considerem um valor contante de $k_\sigma = 4$, o valor mínimo possível para este, representado pela linha horizontal em azul, optou-se, neste trabalho, por usar o valor exato desse parâmetro, dado pela Equação (46).

Em sequência, embora possível de determinação matemática do coeficiente de encurvadura, uma vez utilizando o *software* MATLAB para realizar a plotagem das curvas, foi utilizado o mesmo para encontrar a intersecção entre estas, representando justamente a razão entre comprimento e largura em que ocorre a transição de um número de semi ondas m para um número de $m + 1$. Os valores de transição são mostrados na Tabela 5 juntamente com a configuração de encurvadura anterior à transição.

Tabela 5 – Rácio L/b onde ocorre a transição do número de semi-ondas de encurvadura para elemento interno.

Número de semi-ondas (m)	L/b	Modo de encurvadura
1	1,4142	
2	2,4495	
3	3,4641	

Quando é analisado um elemento externo, seu comportamento de encurvadura é bastante diferente do modelo mostrado anteriormente. Neste caso, o coeficiente de encurvadura para esta configuração de condições de froteira é dado pela Equação (53), [16]. Sua demonstração gráfica é mostrada na Figura 37.

$$k_{\sigma} = 0,425 + (b/L)^2 \quad (47)$$

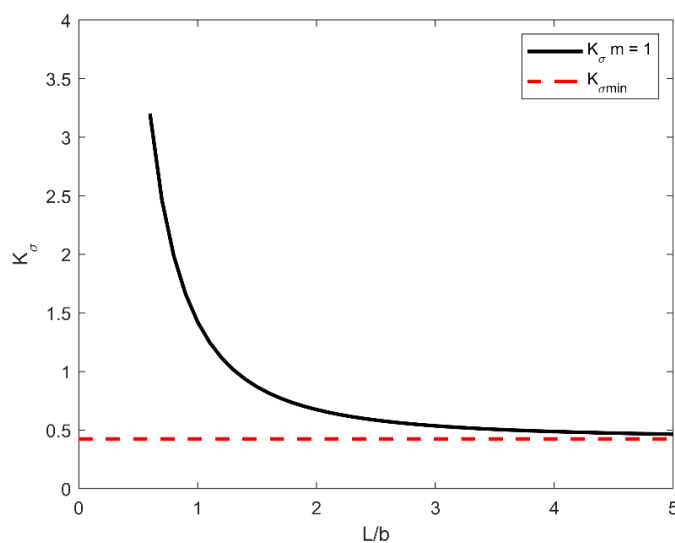


Figura 37 – Coeficiente de encurvadura k_{σ} de placas sólidas – elemento externo.

Pela análise da figura anterior, percebe-se um rápido decrescimento do coeficiente de encurvadura conforme aumenta o rácio L/b da placa. No limite, quando uma placa tem seu comprimento muito maior que sua largura, o coeficiente de encurvadura tende para o valor numérico de 0,425. Ainda, importante ressaltar que neste caso apenas existe uma semi-onda no sentido transversal e uma no sentido longitudinal da placa, independente do rácio L/b . O modo de encurvadura para a configuração de $L/b = 2$ é mostrada na Figura 38.

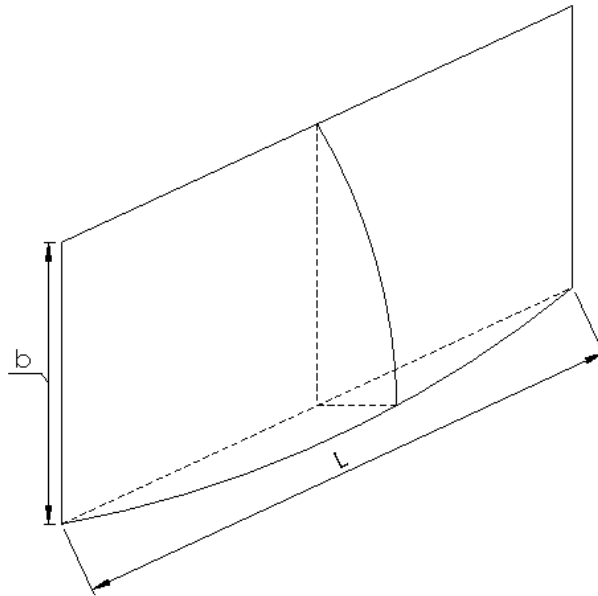


Figura 38 – Primeiro modo de encurvadura de uma placa com um bordo livre.

4.4 Metodologia

Analizando o comportamento dos materiais no regime linear elástico, pretende-se comparar a tensão crítica à encurvadura dos elementos de placa representativos da alma de uma viga I obtidos pelo método dos elementos finitos (MEF) com os resultados exatos do modelo matemático. Esta primeira análise funcionará como uma verificação da correspondência do modelo numérico desenvolvido com a teoria.

Como se sabe, a fabricação de uma viga alveolar a partir de uma viga sólida não exige alterações no banzo. Em contrapartida, mudanças significativas de construção e comportamento acontecem na alma. Verificou-se, na secção 5.2 da proposta de norma do Eurocódigo 3 parte 1-13, [2], que a classificação da alma da viga alveolar depende da classificação do banzo, onde é recomendada a diminuição da alma do Tê. Essa dependência e as considerações propostas geraram dúvidas e o tópico será investigado. Para tal, como

uma segunda etapa, o modelo numérico será alterado para novamente calcular a tensão crítica à encurvadura elástica, desta vez da alma alveolar. Obtendo este valor, será possível calcular a esbelteza normalizada do elemento, de acordo com a Equação (48). O interesse na obtenção da esbelteza normalizada para elementos representativos da alma da viga alveolar é a possibilidade de determinação da classificação dos elementos baseado nos limites dados pelo Eurocódigo 3, parte 1-1, [9].

A tradução dos limites de esbelteza geométrica, dados na Figura 5 e Figura 6, [9], para os limites normalizados referentes à cada classe é feita pela combinação da definição da esbelteza normalizada, dada pela Equação (48), com a Equação(9), a qual retorna a tensão crítica à encurvadura de uma placa sólida. Combinando as expressões e aplicando valores de Módulo de Elasticidade do aço $E = 210GPa$ e Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$, o Eurocódigo 3-1-5, [23], apresenta a Equação (49).

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cri}}} \quad (48)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} \quad (49)$$

Onde $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$; k_σ é obtido pela Equação (46) ou Equação (47), de acordo com o caso analisado.

4.5 Modelo numérico da encurvadura do banzo e alma sólida

Utilizando as informações abordadas no tópico anterior, foi criado um modelo numérico no *software* Ansys Mechanical APDL 19.2 com o objetivo de simular as condições de encurvadura linear elástica para a alma da viga sólida. A criação da malha foi executada por meio da divisão da placa em uma centena de elementos tanto no sentido do comprimento quanto no sentido da altura. Esta escolha se deu principalmente ao fato que, para placas muito esbeltas, com um valor fixo para tamanho do elemento, o número de elementos necessários para descrever toda a placa excedia o valor de 32 000 elementos permitidos para a versão estudantil do software utilizado.

Para o caso da alma, ao longo de todas as linhas da placa, foram considerados apoios em com deslocamento restrito no eixo z , simulando condição de simples apoio ao longo das quatro linhas, representada na Figura 39 pela linha tracejada. Para o banzo, umas das linhas é mantida sem restrição em z , simulando três linhas simplesmente apoiadas e uma livre, representação de elemento externo. Ainda, no bordo representado pela linha de número 1, seu movimento é restrito no eixo y e, para manutenção do equilíbrio, a linha 2 tem deslocamento restrito na direção do eixo x .

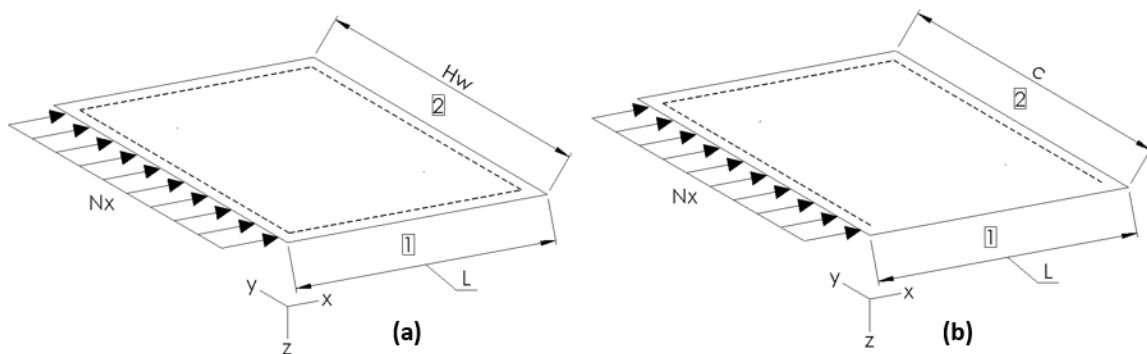


Figura 39 – Representação do modelo de a) alma e b) banzo.

Importante ressaltar que ao longo de todo o trabalho o material utilizado é o Aço S355, o qual tem suas principais propriedades mecânicas mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do aço S355.

Tensão de cedência (MPa)	355
Tensão última (MPa)	470 ~ 630
Módulo de elasticidade (GPa)	190 ~ 210
Densidade (kg/m^3)	7850

Se tratando de uma análise linear elástica, a relação entre tensão e deformação no material tem um padrão linear até o colapso, instante em que um pequeno incremento na carga aplicada provoca uma grande deformação. Neste momento, tem-se um comportamento

como mostrado na Figura 40. O ponto indicado na figura na sequência é o valor utilizado pelo *Software Ansys Mechanical APDL* como indicação da carga crítica.

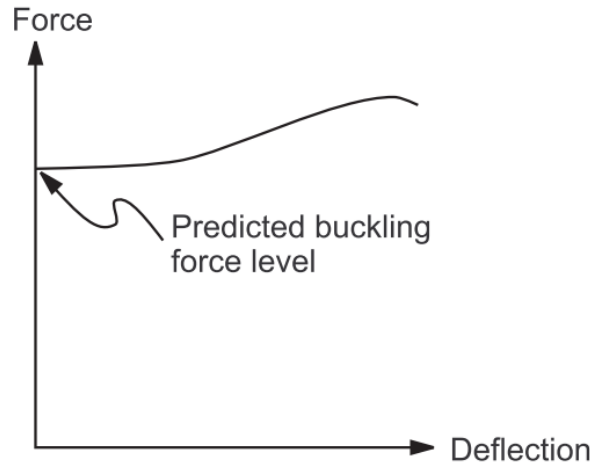


Figura 40 – Obtenção da carga crítica de encurvadura elástica, [33].

A análise do comportamento do material é regida pelo método dos valores e vetores próprios como mostrado na Equação (50). Esta é resolvida pelo método de extração de autovalores nomeado de *Block Lanczos*. Por padrão, este método encontra os modos de encurvadura desde zero até infinito positivo.

$$([K_s] + \lambda_i[S_t])\{\psi_i\} = \{0\} \quad (50)$$

Onde $[K_s]$ é a matriz rigidez; $[S_t]$ a matriz rigidez de tensões; λ_i o autovalor e ψ_i autovetor de deslocamentos.

4.5.1 Estudo paramétrico

Criando um ciclo de variação da esbelteza geométrica no *software Ansys Mechanical APDL*, o parâmetro b/t assume os todos os valores inteiros de 20 a 140 para alma e os valores entre 20 e 100 para o banzo com resolução de 5, conforme mostrado na Tabela 7. Essa diferenciação de tratamento entre alma e banzo é devido ao maior interesse na obtenção de dados sobre a alma. Importante mencionar que são mantidos constantes os valores de espessura t da placa, sendo $t_w = 10,2mm$ para a alma e $t_f = 16mm$ para o banzo, os valores dimensionais da viga comercial IPE500. Percebe-se que, mantendo a espessura da placa constante e variando a esbelteza geométrica, foram analisadas diferentes alturas de

placa. Para o comprimento desta, foram considerados dois casos, sendo o primeiro quando comprimento L da placa é igual a sua altura b e o caso onde $L = 2 * b$.

Prosseguindo a análise, é feita a validação dos resultados obtidos numericamente com a solução analítica apresentada no Capítulo 2 e verificados erros inferiores a 6% para todos os casos e proporções de placas analisadas. Cabe lembrar que o erro é calculado de acordo com a Equação (51).

$$E_r = \frac{\sigma_{cri,s} - \sigma_{cri,ans}}{\sigma_{cri,s}} \quad (51)$$

Sendo $\sigma_{cri,s}$ a tensão crítica à encurvadura dado pelo modelo matemático e $\sigma_{cri,ans}$ a tensão crítica obtida numericamente. Destaca-se a utilização da tensão crítica exata como referência, como percebe-se a utilização no denominador do cálculo do erro. Conhecendo a solução matemática exata do problema, é possível verificar a precisão do modelo numérico criado, de forma a garantir que as pequenas alterações futuras serão condizentes com a realidade.

Na Tabela 8 são mostrados alguns resultados desta análise para a alma e na Tabela 9 para o banzo, sendo que os demais resultados estão disponíveis no Anexo A1, o qual mostra todas as informações obtidas desta comparação.

Tabela 7 – Casos estudados de alma sólida e banzo.

Elemento	Grandeza	
	Esbelteza geométrica (b/t)	Proporção L/b
Alma	[20:1:140]	[1;2]
Banzo	[20:5:100]	[1;2]

Tabela 8 – Comparação dos resultados analíticos com numéricos para alma sólida.

Alma $L = b$				Alma $L = 2 * b$			
Esbelteza (b/t)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)	Esbelteza (b/t)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)
20	1794,31	1898,00	5,46	20	1812,56	1898,00	4,50
30	815,23	843,55	3,36	30	820,81	843,55	2,70
40	463,27	474,50	2,37	40	465,61	474,50	1,87
50	298,24	303,68	1,79	50	299,41	303,68	1,40
60	207,90	210,89	1,42	60	208,56	210,89	1,10
70	153,15	154,94	1,15	70	153,56	154,94	0,89
80	117,49	118,62	0,96	80	117,75	118,62	0,74
90	92,97	93,73	0,81	90	93,15	93,73	0,62
100	75,40	75,92	0,69	100	75,52	75,92	0,53

Tabela 9 – Comparação dos resultados analíticos com numéricos para banzo.

Banzo $L = b$				Banzo $L = 2 * b$			
Esbelteza (b/t)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)	Esbelteza (b/t)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)
20	644,40	676,16	4,93	20	306,68	320,29	4,44
30	289,81	300,52	3,70	30	137,89	142,35	3,24
40	163,89	169,04	3,14	40	77,99	80,07	2,67
50	105,22	108,19	2,82	50	50,08	51,25	2,33
60	73,22	75,13	2,61	60	34,85	35,59	2,11
70	53,87	55,20	2,47	70	25,65	26,15	1,95
80	41,28	42,26	2,36	80	19,66	20,02	1,84
90	32,65	33,39	2,28	90	15,55	15,82	1,74
100	26,46	27,05	2,22	100	12,60	12,81	1,67

A investigação do modelo do banzo foi feita justamente para representar um elemento externo, entendendo seu comportamento de encurvadura uma vez que sua modelagem representa o mesmo tratamento dado pelo Eurocódigo 3 para a alma do Tê.

4.6 Modelo numérico da encurvadura da alma alveolar

4.6.1 Placa quadrada

Com a verificação da fidelidade do modelo numérico criado inicialmente, este foi modificado para o comportar o furo presente na alma da viga alveolar. Para além dos parâmetros já necessários em uma viga sólida, o caso da viga alveolar exige que sejam definidos ainda: diâmetro da abertura, distância entre furos e posicionamento do furo na alma. Para as análises feitas ao longo do presente trabalho, sempre é considerada a condição de excentricidade nula, ou seja, o centro da abertura sempre está posicionado em $H_w/2$.

Ainda, percebe-se que uma viga alveolar é composta por uma repetição de padrões com comprimento igual a distância S entre furos, conforme mostrado na Figura 41. Para executar a análise desejada, foi utilizado um segmento com comprimento S contendo um furo completo e duas metades de montante da alma, conforme realçado.

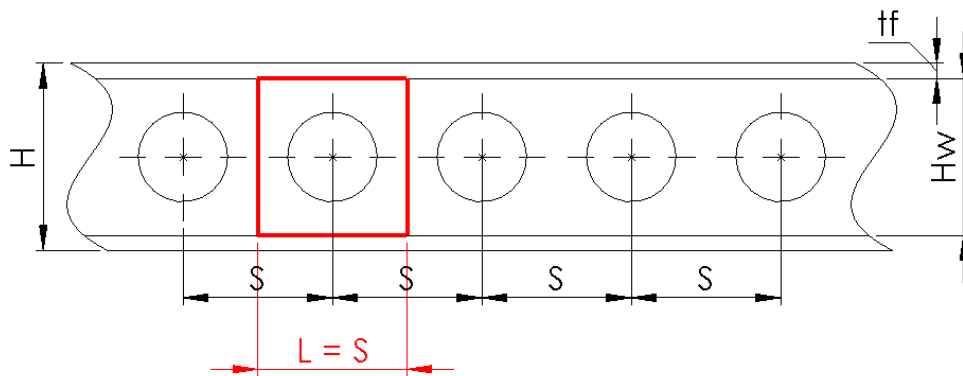


Figura 41 – Representação do padrão da viga alveolar: espaçamento S entre as aberturas.

Percebe-se que não foram considerados os banzos. Essa escolha foi por questões simplificadoras. Dessa forma, pode-se tratar o segmento analisado como uma placa fina com um furo central, tendo as dimensões de $L = S$ para o comprimento e H_w para a altura. Ainda, o maior interesse consista na investigação da alma da viga alveolar. As condições de fronteira se mantiveram idênticas à alma sólida, porém agora foi optado pela escolha de uma malha com tamanho fixo de 15mm, após a verificação que a divisão em número constante de elementos feita no caso anterior não descrevia com exatidão a superfície da placa com furo. A Figura 42 mostra o desenho técnico do modelo estudado.

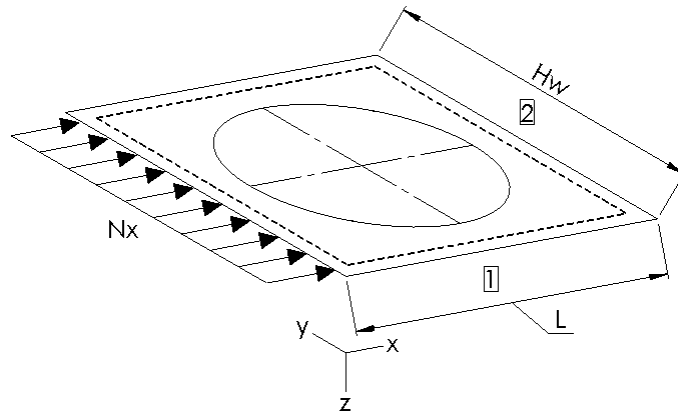


Figura 42 – Modelo criado representando a alma da viga alveolar.

A tensão crítica de encurvadura para uma placa sólida é inversamente proporcional ao quadrado da esbelteza geométrica, conforme descrito no Capítulo 2. Introduzindo um furo na placa, espera-se que o diâmetro deste tenha uma influência significativa na tensão crítica à encurvadura. Desta forma, são realizadas uma série de simulações numéricas do modelo criado, variando a esbelteza geométrica (H_w/t_w) e também a razão entre diâmetro e altura da placa (d_0/H_w). Onde d_0 representa o diâmetro da abertura e H_w a largura da placa. Na alma da viga, H_w desconsidera os raios de concordância. Como no caso analisado a placa é quadrada, este parâmetro representa também o comprimento da placa. A proposta do Eurocódigo 3 parte 1-13, [2], traz um escopo de normalização aplicável para esbeltezas geométricas H_w/t_w não superiores à 124ε . Nesse sentido, foram executadas simulações numéricas variando a esbelteza geométrica entre 20 e 124, abrangendo o caso de $\varepsilon = 1$, com resolução de uma unidade, combinadas com a variação da razão d_0/H_w de zero, representando uma viga alma sólida, sem furo, até $d_0 = 0,8 * H_w$, de modo a restar, no mínimo, 10% de material na placa na posição do furo, com resolução de 0,1. Os dados estudados nesta secção são mostrados na Tabela 10. Alguns resultados obtidos de tensão crítica estão mostrados na Tabela 11, sendo os restantes disponíveis no Anexo A2.

Tabela 10 – Casos estudados de alma alveolar.

Grandeza	Domínio e resolução
d_0/H_w	[0: 0,1: 0,8]
H_w/t_w	[20: 1: 124]

Tabela 11 – Tensão crítica para uma placa com abertura central axialmente comprimida.

Tensão Crítica Ansys (MPa)	$d01H_w$	$d02H_w$	$d03H_w$	$d04H_w$	$d05H_w$	$d06H_w$	$d07H_w$	$d08H_w$
Esbelteza (b/t)								
20	1753,40	1601,36	1471,66	1382,70	1307,70	1214,77	1070,37	869,25
25	1131,47	1035,99	952,37	895,22	851,00	792,57	697,07	572,90
30	790,84	724,20	665,97	626,34	595,88	555,59	491,64	405,41
35	583,45	534,37	491,56	462,56	441,03	411,87	365,20	301,99
40	448,08	410,44	377,65	355,80	339,05	316,87	281,74	233,39
45	354,69	325,08	299,17	281,90	268,98	251,61	223,90	185,73
50	287,81	263,79	242,92	228,84	218,41	204,61	182,00	151,36
55	238,21	218,33	201,07	189,55	180,87	169,49	150,98	125,65
60	200,40	183,68	169,17	159,50	152,31	142,79	127,26	105,97
65	170,88	156,67	144,30	136,07	129,96	121,93	108,71	90,58
70	147,46	135,20	124,54	117,44	112,23	105,28	93,95	78,33
75	128,55	117,86	108,57	102,42	97,86	91,85	81,96	68,39
80	113,05	103,64	95,49	90,08	86,11	80,81	72,15	60,22
85	100,20	91,85	84,64	79,85	76,33	71,67	64,01	53,45
90	89,41	81,97	75,53	71,27	68,15	64,00	57,17	47,75
95	80,28	73,60	67,83	64,01	61,20	57,48	51,35	42,91
100	72,48	66,45	61,24	57,79	55,26	51,92	46,40	38,78
105	65,76	60,29	55,57	52,44	50,16	47,12	42,12	35,21
110	59,93	54,95	50,65	47,81	45,72	42,96	38,41	32,12
115	54,85	50,29	46,35	43,75	41,85	39,33	35,17	29,41
120	50,39	46,20	42,58	40,20	38,45	36,14	32,32	27,03

Após a execução das simulações, iniciou-se uma análise mais detalhada dos dados obtidos usando o *Software* MATLAB. A Figura 43 apresenta a análise feita usando a ferramenta *CFTool*, capaz que aproximar os dados introduzidos por uma superfície e gerar uma equação que descreva com tanta precisão quando possível a distribuição dos valores. Percebe-se que esta análise foi executada a partir de três parâmetros, sendo eles: d_0/H_w , H_w/t_w e $\sigma_{cri,n}$. É importante ressaltar que a grandeza $\sigma_{cri,n}$ representa o rácio da tensão crítica à encurvadura da placa com furo pela tensão crítica à encurvadura da placa sólida, conforme mostrado na Equação (52). A tensão crítica da placa sólida é dada pela Equação (9), apresentada no Capítulo 2.

$$\sigma_{cri,n} = \frac{\sigma_{cri,ans}}{\sigma_{cri,s}} \quad (52)$$

A relação das variáveis citadas é exposta na Figura 43 – (a), já com uma superfície proposta pelo *Software* MATLAB para aproximação dos pontos. Na parte (b) desta mesma figura, são mostrados os resíduos desta aproximação.

Os resíduos de um modelo ajustado são definidos pela diferença entre os dados analisados e o ajuste à estes dados em cada valor preditivo, [34].

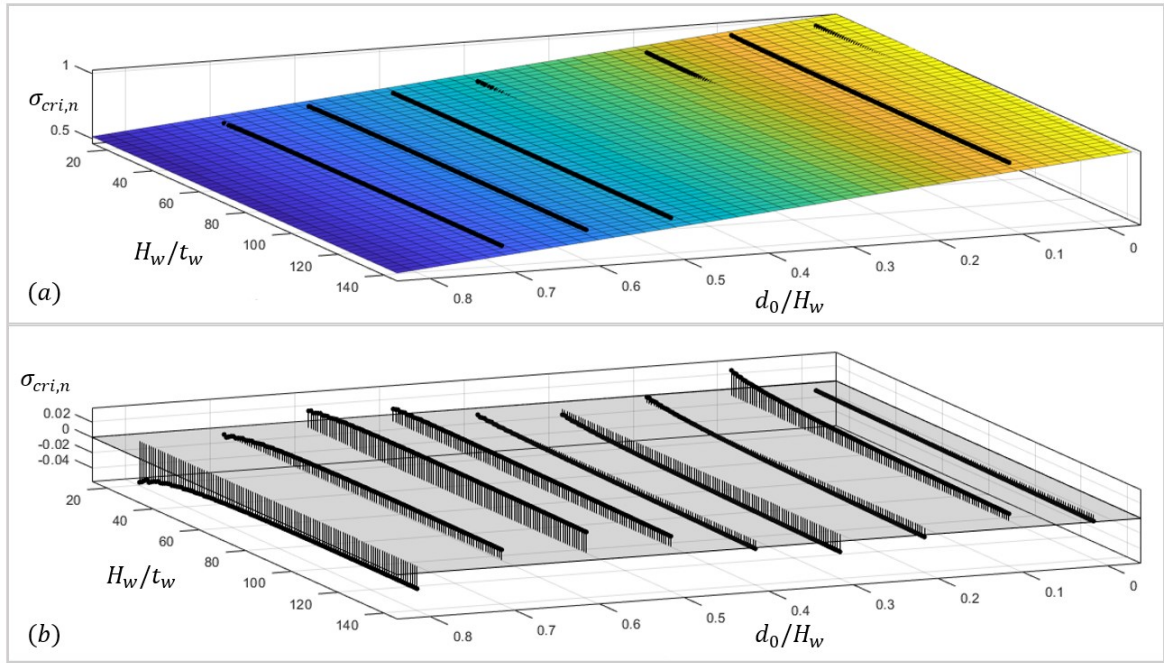


Figura 43 – a) Aproximação dos pontos por uma superfície através do MATLAB e b) resíduos da aproximação.

Com a plotagem dos pontos obtidos nas simulações numéricas e sua análise em 3D no *software* MATLAB, percebeu-se que a aproximação da superfície gerada poderia ser feita utilizando um polinômio de grau 1 para o parâmetro d_0/H_w e também para H_w/t_w , utilizando a ferramenta de regressão linear automática do MATLAB, por meio da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Lineares, do Inglês *Linear Least Squares* de forma a obter a tensão crítica a encurvadura normalizada $\sigma_{cri,n}$. A superfície gerada na Figura 43 é descrita com precisão pela Equação (53).

$$\sigma_{cri,n} = \left(1 + k1 * \frac{d_0}{H_w} + k2 * \frac{H_w}{t_w} \right) \quad (53)$$

$$k1 = -0,578$$

$$k2 = 6,07 * 10^{-5}$$

Como pode ser percebido, o coeficiente $k2$ que está a multiplicar a esbelteza geométrica H_w/t_w assume um valor extremamente baixo, o que leva a interpretação da sua baixa influência à tensão crítica normalizada $\sigma_{cri,n}$. Para a verificação da precisão da Equação (53), já ignorando o coeficiente $k2$, foi comparada a tensão crítica obtida numericamente pelo *Software Ansys Mechanical APDL* com a tensão crítica dada pela equação proposta, obtendo erros máximos de 6% para casos de elevado diâmetro da abertura e baixas esbeltezas geométricas.

4.6.2 Placa com comprimento variável

Dado a consideração da influência praticamente nula da esbelteza geométrica (H_w/t_w) na tensão crítica normalizada a encurvadura $\sigma_{cri,n}$, percebeu-se a possibilidade de usar um valor fixo para este parâmetro e realizar um novo conjunto de simulações, variando agora um terceiro parâmetro: o rácio entre comprimento e altura da placa juntamente com rácio entre altura da placa e diâmetro da abertura. Esse conjunto de simulações realizado não considera mais apenas o caso da placa quadrada, mas abrange os casos desde a placa quadrada até uma placa retangular com comprimento 2 vezes superior à largura. Conforme informações obtidas no catálogo comercial da ArcelorMittal para vigas alveolares, [35], o espaçamento entre as aberturas, também o mesmo valor para comprimento do segmento analisado neste trabalho, varia comercialmente entre 1 e 2 vezes a altura total da viga que originou a viga alveolar. Com isso, foi optado pela análise e simulações de placas dentro do seguinte intervalo:

$$1 \leq L/H_w \leq 2$$

$$0 \leq d_0/H_w \leq 0,8$$

Onde L representa o comprimento da placa analisada. Os casos estudados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados simulados nesta secção.

Grandeza	Domínio e resolução
d_0/H_w	[0: 0,1: 0,8]
L/H_w	[1: 0,05: 2]
H_w/t_w	50

Para dar sequência com a performance das simulações numéricas descritas, considerou-se, novamente, o caso de toda a secção transversal da viga estar sob compressão, o caso mais crítico para a instabilidade de encurvadura analisada. Com isso, o modelamento numérico da alma alveolar consiste em uma placa comprimida axialmente com todos os bordos apoiados.

Para este novo conjunto de simulações, foram mantidas todas as condições de fronteira, carga e variação de d_0/H_w . Agora, porém, a esbelteza geométrica assume um valor constante e arbitrário de $H_w/t_w = 50$. A Figura 44 mostra a malha criada para uma placa retangular com $d_0/H_w = 0,4$ e $L/H_w = 2$. A seguir, a Figura 45 mostra o primeiro modo de instabilidade desta mesma placa, sendo o código de cores na placa o elemento representativo para o deslocamento desta no eixo perpendicular ao plano da placa. Na Figura 46, a razão entre comprimento e largura é diminuída para 1,6.

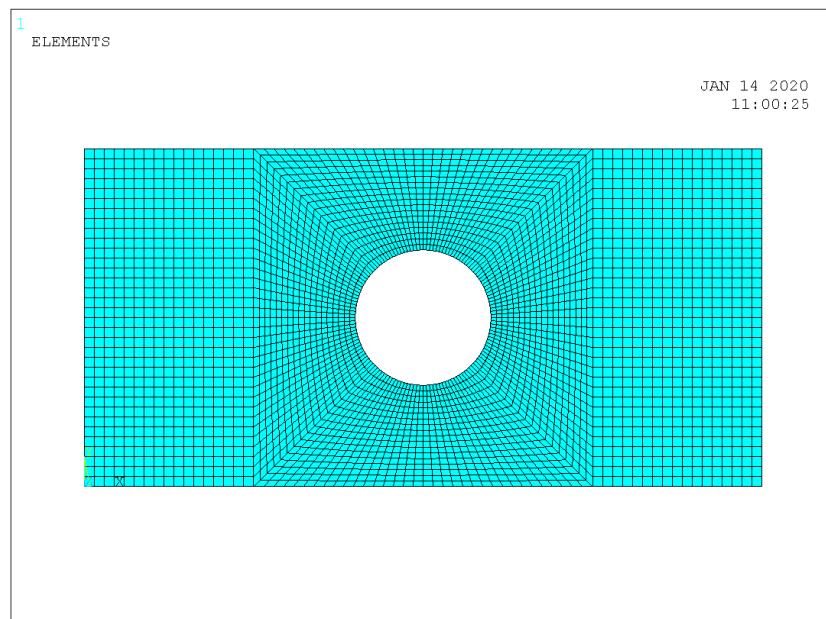


Figura 44 – Malha gerada para análise de placas retangulares com furo.

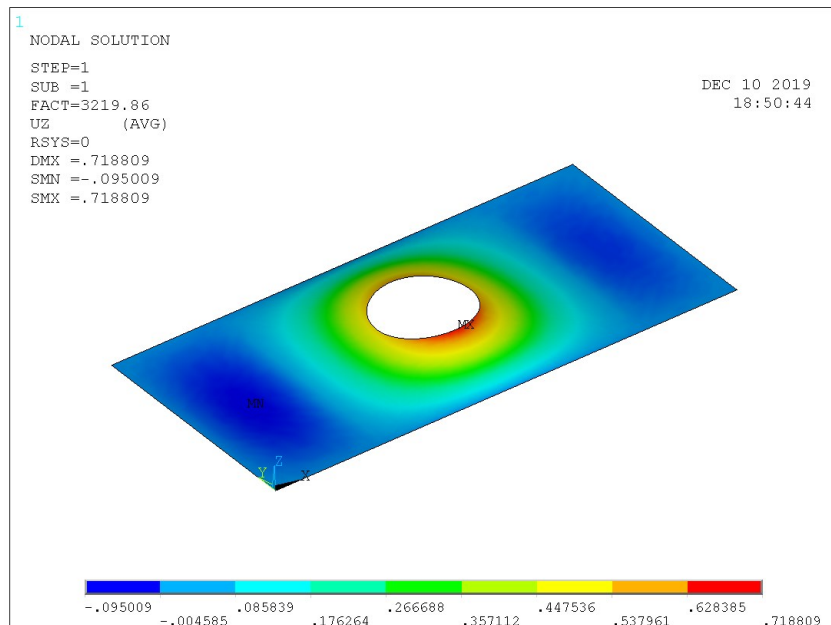


Figura 45 – Primeiro modo de encurvadura elástica para a placa nas condições citadas.

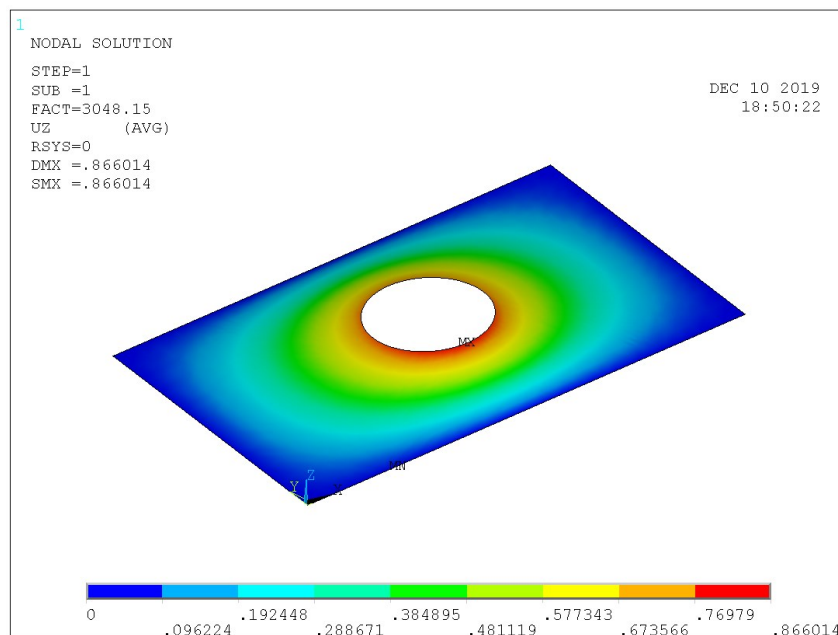


Figura 46 – Primeiro modo de encurvadura para placa com $L/H_w = 1,6$

O Anexo A3 tal traz mais imagens representativas do primeiro modo de instabilidade variando diâmetro da abertura e comprimento da placa e o Anexo A4, mostra todos os valores de tensão crítica obtidos para os intervalos propostos.

Percebe-se que, embora o deslocamento seja superior na região do furo, para a condição de placa com $L/H_w = 2$ é iniciado o desenvolvimento de mais duas semi ondas

mais curtas no elemento, adjacentes ao furo, ao modo que para o caso de $L/H_w = 1,6$ ainda só há uma semi onda clara. Nesse sentido, percebe-se que a introdução de uma abertura central na placa provoca alterações significativas no número de semi-ondas do primeiro modo de encurvadura quando comparado à uma placa sólida. Na Figura 47 é mostrado o como se altera o modo de encurvadura e número de semi-ondas presentes para determinados rácios d_0/H_w . O eixo vertical representa a tensão crítica obtida do modelo numérico, $\sigma_{cri,ans}$ normalizada pela tensão crítica da placa sólida, $\sigma_{cri,s}$. O eixo horizontal representa a variação da grandeza L/H_w .

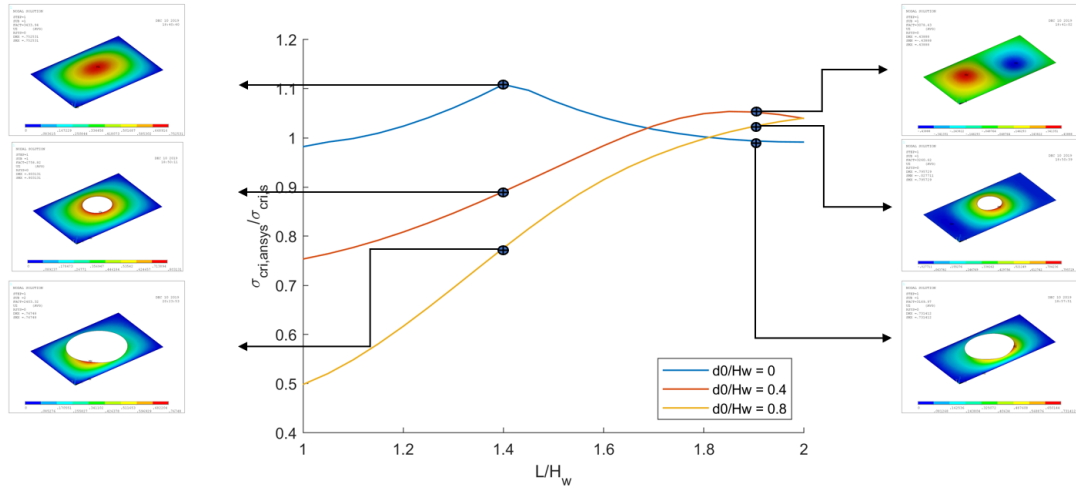


Figura 47 – Falha por encurvadura elástica para $\frac{d_0}{H_w} = 0; 0,4; 0,8$.

Para a plotagem das curvas, foi propositalmente considerado o coeficiente de encurvadura da placa sólida k_σ como constante e igual a 4. Embora já tenha sido mostrado que este coeficiente varia conforme é aumentada a razão entre comprimento e largura da placa, a razão para sua consideração constante é uma melhor visualização do comportamento da tensão crítica e do ponto de transição do número de semi ondas.

Ainda sobre a Figura 47, à sua esquerda estão mostrados os modos de falha para o instante em que $L/H_w = 1,4$, instantes antes do ponto transição de uma para duas semi ondas na direção L . À direita desta, são plotados o primeiro modo de encurvadura para $L/H_w = 1,9$. Pode-se perceber que a placa sólida tem completamente desenvolvidas as duas semi ondas de encurvadura. Para $d_0/H_w = 0,4$ já pode ser percebida a tendência do surgimento da próxima configuração de semi ondas, enquanto o caso de $d_0/H_w = 0,8$ ainda não é possível perceber nenhuma tendência. Interessante ressaltar que algumas configurações de comprimento x largura da placa e diâmetro da abertura permitem a obtenção de maiores

resistências à encurvadura que a própria placa sólida. As curvas referentes aos demais rácios de d_0/H_w são mostrados na Figura 48, omitindo o modelo de encurvadura. Percebe que praticamente todos os diâmetros de aberturas, em algum momento da variação de L/H_w provocam um aumento da tensão crítica elástica.

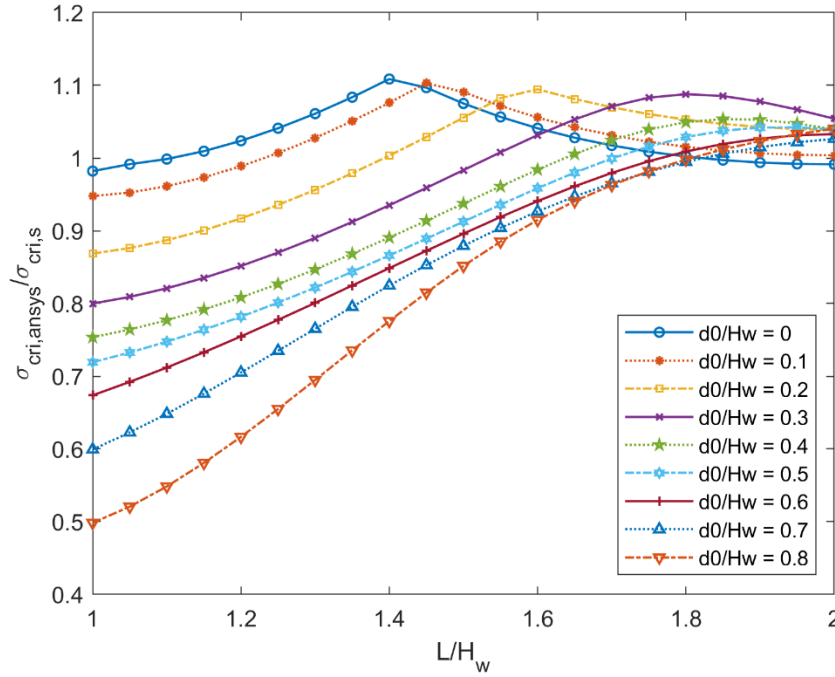


Figura 48 – Encurvadura elástica normalizada em função do comprimento da placa.

4.6.2.1 Descrição analítica

Prosseguindo com as análises, faz-se necessário descrever o comportamento de encurvadura das placas analisadas levando em consideração a variação do diâmetro da abertura e também do comprimento da placa. Nesta etapa, é feita uma análise tridimensional dos resultados obtidos, de modo a relacionar os parâmetros envolvidos. Como já descrito, é adotado um valor constante para a esbelteza geométrica da placa, sendo este $H_w/t_w = 50$. Ao longo do presente trabalho, serão considerados outros valores de esbelteza geométrica, de modo a confirmar a fidelidade e correspondência dos resultados obtidos para todo o domínio desejado.

Inicialmente, os resultados obtidos numericamente são organizados em colunas de acordo com a grandeza e posteriormente importados para o *software* MATLAB utilizando o comando *xlsread*. Uma vez tendo os dados carregados, utiliza-se a extensão do MATLAB intitulada de *CFTool*, uma importante ferramenta que permite a plotagem tridimensional das

grandezas e, automaticamente, cria uma superfície que busca aproximar os dados por uma superfície regida por polinômios com grau e coeficientes editáveis. Como já obtido anteriormente, sabe-se que normalizando a tensão crítica à encurvadura obtida numericamente, $\sigma_{cri,ans}$ pela tensão crítica à encurvadura de uma placa sólida equivalente, $\sigma_{cri,s}$, perde-se a influência da esbelteza geométrica H_w/t_w . Com isso, os dados importados para o *software* são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Grandezas importadas para o MATLAB.

Grandeza	Domínio e resolução
d_0/H_w	[0: 0,1: 0,8]
L/H_w	[1: 0,05: 2]
$\sigma_{cri,ans}$	Obtida numericamente

As grandezas geométricas foram analisadas diretamente na extensão *CFTool*, já a tensão crítica a encurvadura foi normalizada conforme a Equação (54) e posteriormente importada para a extensão mencionada.

$$k_{\sigma,h} = \frac{\sigma_{cri,s,mod}}{\sigma_{cri,ans}} \quad (54)$$

Onde $k_{\sigma,h}$ representa a normalização das grandezas de tensão crítica analítica e numérica. A escolha dessa notação tem por objetivo tornar a análise mais intuitiva. É importante ressaltar que, por questões de suavização da superfície, a tensão crítica à encurvadura da placa sólida é modificada e assume a denominação de $\sigma_{cri,s,mod}$.

Uma breve análise dos resultados através da superfície gerada tornou clara a necessidade de divisão do domínio L/H_w . Com isso, são executadas duas análises distintas, sendo a primeira utilizando a divisão: $1 \leq L/H_w \leq 1,4$ e a segunda $1,4 \leq L/H_w \leq 2$. Ainda, como mencionado anteriormente, é utilizada uma tensão crítica de modificada, dada pela Equação (55) para o primeiro intervalo e pela Equação (56) para o segundo intervalo.

$$\sigma_{cri,s,mod,1-1.4} = \frac{\sigma_{cri,s}}{k_{\sigma}} \quad (55)$$

$$\sigma_{cri,s,mod,1.4-2} = \frac{\sigma_{cri,s}}{k_{\sigma}} \left(1 - 0,3 * \frac{d_0}{H_w} \frac{L}{H_w} \right) \quad (56)$$

Como fator comum nas expressões demonstradas, pode ser percebido que optou-se por fazer a divisão da tensão crítica analítica da placa sólida pelo seu coeficiente de encurvadura k_{σ} . A razão para tal foi a verificação de que, embora ele descreva com exatidão a variação da tensão para uma placa sólida, a introdução de uma abertura nesta placa altera completamente seu comportamento. Ainda, espera-se a obtenção de um coeficiente de encurvadura da placa com furo central $k_{\sigma,h}$ independente do coeficiente da placa sólida.

Nota-se que, além da divisão da tensão crítica analítica pelo seu coeficiente de encurvadura, na segunda parte do domínio analisado é feita a multiplicação por um fator dependente dos parâmetros $\frac{d_0}{H_w}$ e $\frac{L}{H_w}$. A escolha desta configuração para a normalização se deu basicamente pela análise do comportamento da superfície gerada sem essa multiplicação e pela identificação visual de pontos de não suavidade. Percebendo uma aparente dependência do termo cruzado exposto como razão para a não suavidade, optou-se por diminuir a influência desses parâmetros durante a normalização, tomando cuidado para que a Equação (56) não tenha domínio para além da origem, de modo a causar uma descontinuidade. Para tal, foi utilizado o coeficiente multiplicando o termo cruzado de 0,3. Um aumento desse coeficiente gera uma suavização da superfície, porém faz com que esta tenha uma parcela negativa, o que não é de interesse. Com a subdivisão do domínio, normalização da tensão crítica de acordo com o intervalo proposto e análise dos resultados, são plotadas as Figura 49 e Figura 50.

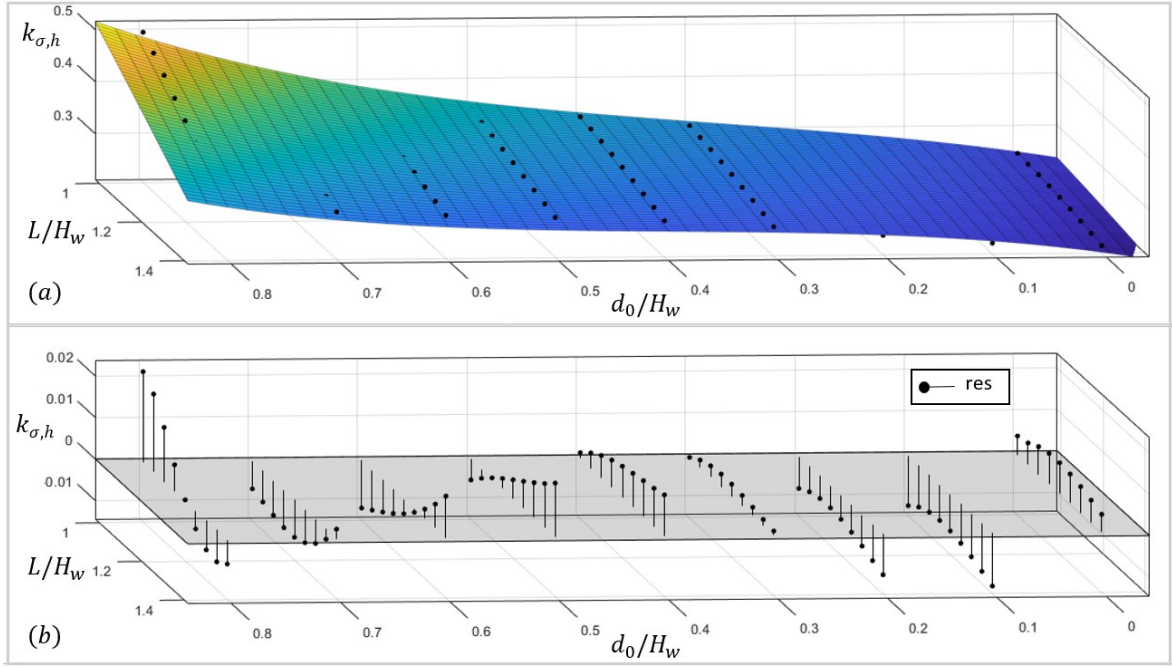


Figura 49 – a) Superfície aproximada em função dos parâmetros $\frac{d_0}{H_w}$ e $\frac{L}{H_w}$ para o primeiro intervalo e b) resíduos da aproximação.

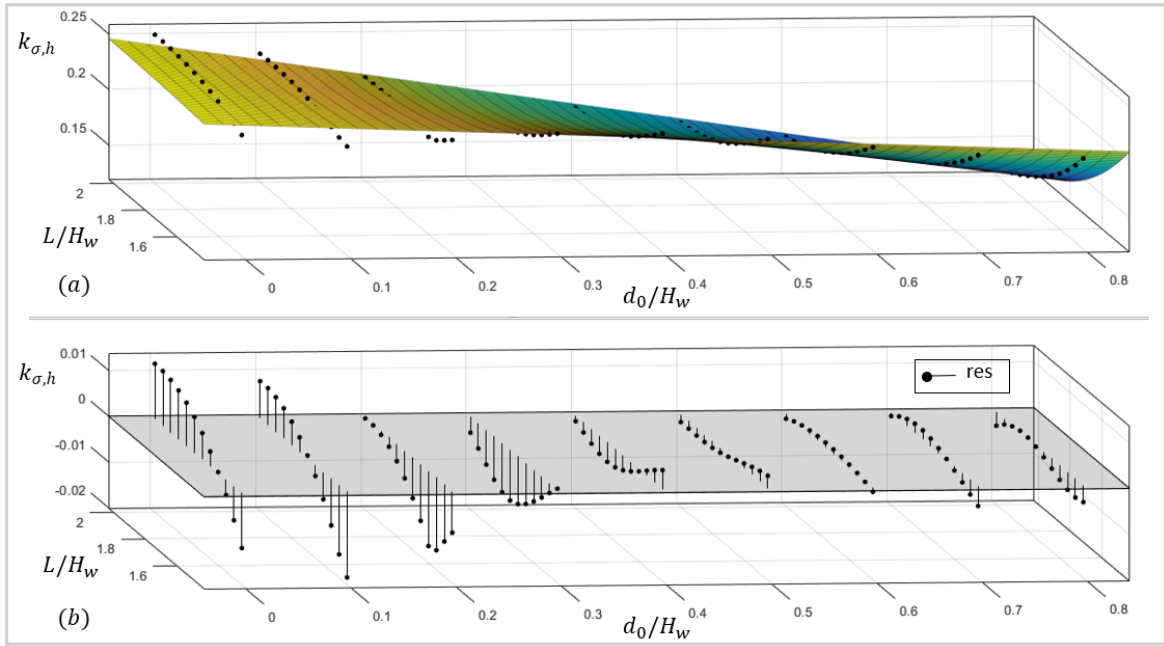


Figura 50 – a) Superfície aproximada em função dos parâmetros $\frac{d_0}{H_w}$ e $\frac{L}{H_w}$ para o segundo intervalo e b) resíduos desta aproximação.

A extensão utilizada retorna o polinômio responsável pela geração das superfícies mostradas anteriormente por meio da minimização quadrática linear, [34]. Para o primeiro

intervalo analisado, ou seja $1 \leq L/H_w \leq 1,4$ o polinômio obtido para sua descrição é mostrado na Equação (57) e para o segundo intervalo, entre $1,4 \leq L/H_w \leq 2$, é mostrado na Equação (58). Para a obtenção destes polinômios, foi permitido ao *software* utilizar aproximações até grau 3. Após a análise do *output* recebido, optou-se por fazer a simplificação das equações, eliminando termos com baixa influência e arredondando os coeficientes obtidos, sempre mantendo cuidado para que a precisão do polinômio se mantivesse dentro de intervalos aceitáveis, paralelamente verificando a qualidade estatística de ajuste da superfície.

$$k_{\sigma,h,1-1.4} = \left(0,28 + 0,3 \frac{d_0}{H_w} - 0,03 \left(\frac{L}{H_w} \right)^2 + 0,58 \left(\frac{d_0}{H_w} \right)^3 - 0,48 \left(\frac{d_0}{H_w} \right)^2 * \frac{L}{H_w} \right) \quad (57)$$

$$k_{\sigma,h,1.4-2} = \left(0,24 + 0,9 \frac{d_0}{H_w} - \frac{d_0}{H_w} * \frac{L}{H_w} + 0,24 \frac{d_0}{H_w} * \left(\frac{L}{H_w} \right)^2 \right) \quad (58)$$

Essas expressões obtidas são bastante importantes pois descrevem a tensão crítica normalizada agindo em uma placa axialmente comprimida com um furo central. Aplicando esses resultados na Equação (54) bem como os respectivos valores de tensão crítica modificada, é possível rearranjar os termos e substituir o valor obtido numericamente para a tensão crítica do elemento $\sigma_{cri,ans}$ por uma tensão crítica à encurvadura calculada. Fazendo essa substituição, para o intervalo entre $1 \leq L/H_w \leq 1,4$ é proposta a Equação (59) e para o intervalo $1,4 \leq L/H_w \leq 2$ é proposta a Equação (60).

$$\sigma_{cri,h,1-1.4} = \frac{\sigma_{cri,mod,s,1-1.4}}{k_{\sigma,h,1-1.4}} \quad (59)$$

$$\sigma_{cri,h,1.4-2} = \frac{\sigma_{cri,mod,s,1.4-2}}{k_{\sigma,h,1.4-2}} \quad (60)$$

As equações propostas para descrição da tensão crítica de encurvadura elástica foram implementadas no *Software* MATLAB e tiveram seus resultados comparados com a tensão crítica importada do Ansys APDL. O erro máximo ($E_{r,a}$), calculado conforme a Equação (61) é de 8%, com baixa ocorrência, apresentados valores normalmente menores para grande

parte das combinações dos parâmetros $\frac{L}{H_w}$, $\frac{d_0}{H_w}$ e $\frac{H_w}{t_w}$. O valor é considerado aceitável e o trabalho pode prosseguir. O valor de referência para o cálculo do erro é tensão obtida numericamente.

$$E_{r,a} = \frac{\sigma_{cri,h} - \sigma_{cri,ans}}{\sigma_{cri,ans}} \quad (61)$$

O valor de $\sigma_{cri,h}$ é obtido pela Equação (59) ou Equação (60) de acordo com o intervalo desejado.

Capítulo 5: Comparação e aplicação da nova metodologia de classificação das secções transversais

5.1 Introdução

Conforme descrito no Capítulo 4, era de grande interesse a obtenção de uma equação analítica capaz de descrever a tensão crítica à encurvadura de uma placa com furo axialmente comprimida. A razão disso é a possibilidade do cálculo da esbelteza normalizada do elemento representativo da alma da viga alveolar.

O limite das classes dado no Eurocódigo 3-1-1, [9], é função da direta da esbelteza geométrica das secções transversais b/t , sendo diferentes para elementos considerados internos e externos. Conforme dado no Eurocódigo 3-1-5, [23], é possível fazer a transformação de uma esbelteza geométrica para uma esbelteza normalizada de acordo com a Equação (62).

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} \quad (62)$$

Dessa forma, dados os limites existentes para as placas sólidas, considerando o montante de rotação necessário para ser classificado em determinada classe, é possível transformá-los em esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_p$ e desta forma realizar a comparação com as esbeltezas obtidas para um elemento representativo da alma da viga alveolar. Como pode ser percebido, os limites são dependentes do coeficiente de encurvadura de placas sólidas k_σ . Este, por sua vez, é calculado de acordo com a Equação (46) para elementos internos e pela Equação (47). É importante ressaltar que, fazendo esta transformação, tem-se agora a

influência da razão entre comprimento e largura da placa L/H_w , de modo que os limites são flutuantes.

Para elementos considerados externos, optou-se por utilizar os limites de esbelteza geométricos, de acordo com a Tabela 14, uma vez que, embora possível, não é necessário fazer a transformação em esbeltezas normalizadas.

Tabela 14 - Limites para classificação de elementos externos.

Limites EC3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Esbelteza geométrica c/t	9ε	10ε	14ε

5.2 Classificação das secções segundo o EC3

Aplicando a Equação (62), são transformados os limites de esbelteza geométrica do Eurocódigo 3-1-1, [9] em limites de esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}_p$, sendo estes mostrados na Tabela 15 para elementos internos. Importante ressaltar que estes limites estão dados na Figura 5 e Figura 6 e a situação utilizada é de uma secção transversal totalmente carregada por esforço compressivo.

Tabela 15 – Transformação dos limites para classificação de elementos internos.

Limites EC3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Esbelteza geométrica b/t	33ε	38ε	42ε
L/H_w	Esbelteza normalizada		
1	0,5810	0,6690	0,7394
1,1	0,5784	0,6660	0,7361
1,2	0,5715	0,6580	0,7273
1,3	0,5615	0,6466	0,7147
1,4	0,5496	0,6329	0,6995
1,5	0,5577	0,6423	0,7099
1,6	0,5668	0,6527	0,7214
1,7	0,5734	0,6603	0,7298
1,8	0,5778	0,6653	0,7354
1,9	0,5802	0,6681	0,7385
2	0,5810	0,6690	0,7394

Uma vez tendo a esbelteza normalizada limite de cada classe dada pelo Eurocódigo 3-1-1, [9], e estando em posse dos elementos para o cálculo desta de acordo com a nova metodologia proposta, é possível fazer a comparação dos resultados e verificar o comportamento do elemento à nível global.

Conforme descrito na proposta de norma do cada classe dada pelo Eurocódigo 3-1-1, [9], e estando em posse dos elementos para o cálculo desta de acordo com a nova metodologia proposta, é possível fazer a comparação dos resultados e verificar o comportamento do elemento à nível global. Eurocódigo 3-1-13, [2], a existência de uma abertura na alma da viga exige que a alma do Tê seja tratado como elemento externo. A seguir, são transformados os limites de esbelteza geométrica do elemento para uma função do rácio entre o diâmetro do furo e altura da alma da viga, desconsiderando os raios de concordância. A Figura 51 mostra os parâmetros da alma da viga alveolar e pela sua análise, é extraída a Equação (63).

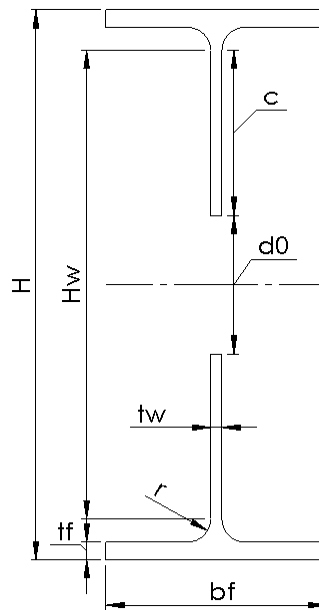


Figura 51 – Parâmetros da alma da viga alveolar.

$$H_w = 2 * c + d_0 \quad (63)$$

Onde c representa o comprimento da alma do Tê, descontado o raio de concordância. É possível substituir o valor c para os diversos limites de classificação dados na Tabela 14, conforme mostrado a seguir. Ainda, modificando a equação para d_0/H_w , podem ser obtidos os valores do rácio apresentado que provocam a mudança de classes.

$$\begin{aligned}
 \text{Classe 1} \quad \frac{d_0}{H_w} &= \frac{1}{H_w} (H_w - 18t\epsilon) \\
 \text{Classe 2} \quad \frac{d_0}{H_w} &= \frac{1}{H_w} (H_w - 20t\epsilon) \\
 \text{Classe 3} \quad \frac{d_0}{H_w} &= \frac{1}{H_w} (H_w - 28t\epsilon)
 \end{aligned} \tag{64}$$

Para seguir as análises percorridas neste trabalho, são escolhidos quatro perfis estruturais comerciais sólidos com esbeltezas geométricas da alma próximas à esbelteza de transição de classes. Na Tabela 16 são mostrados os perfis escolhidos e são calculados os valores limites de d_0/H_w , substituídos os valores da altura e espessura da alma, respectivamente H_w e t para cada perfil. A intenção é mostrar que variações neste rácio provocam mudanças na classificação do perfil.

Tabela 16 – Rácios d_0/H_w que provocam mudança de classes para os perfis indicados.

Perfil	H_w/t	Classificação da alma sólida	d_0/H_w Classe 1	d_0/H_w Classe 2	d_0/H_w Classe 3
IPE160	25,44	Classe 1	0,424	0,360	0,105
IPE240	30,71	Classe 2	0,523	0,470	0,258
IPE270	33,27	Classe 3	0,560	0,511	0,315
IPE300	35,01	Classe 4	0,582	0,535	0,349
IPE500	41,76	Classe 4	0,649	0,610	0,455

Percebe-se claramente que, conforme é aumentado o diâmetro do furo, a classe tende a diminuir de acordo com o Eurocódigo 3. A principal razão para tal é a diminuição do comprimento da alma do Tê, de forma que é reduzido o comprimento c do elemento em consola.

5.3 Aplicação da nova metodologia de classificação das secções transversais

Para secções sólidas de alma muito esbeltas, a introdução de uma abertura muito pequena, provoca um súbito aumento na sua classificação segundo o Eurocódigo 3. Isso ocorre, pois, a partir do momento que é introduzida uma abertura, têm-se efetivamente uma secção transversal caracterizada por 2-Tê com três elementos em consola em cada Tê, como mostrado na Figura 52, onde c_f é o comprimento em consola do banzo e c_w o comprimento em consola da alma. Nesta configuração, não é incomum que alma do Tê tenha comprimento suficientemente elevado para automaticamente classificar toda a secção transversal como classe 4.

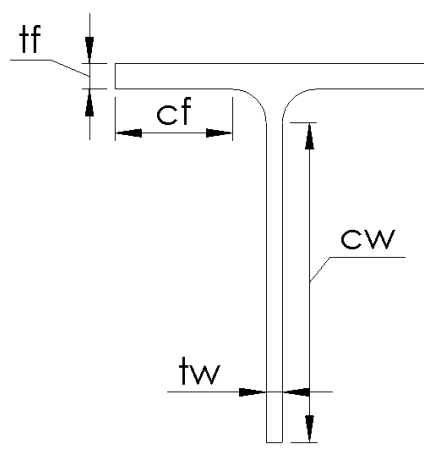


Figura 52 – Representação dos elementos constituintes da secção Tê.

Como forma de evitar que uma pequena abertura possa limitar toda a secção transversal, a proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], em sua Cláusula 5.2, recomenda que, em momento fletor puro, o comprimento da alma do Tê em consola deva ser reduzido para o comprimento limite de classificação de acordo com a classe do banzo. Essa condição gera dúvidas pois, de maneira fictícia, considera um comprimento reduzido sem explorar as consequências na resistência à encurvadura do elemento nem sobre o desprezo de material.

A concentração dos esforços deste trabalho se deu no desenrolar da dependência entre estes parâmetros e na verificação da veracidade dos métodos de classificação propostos pelas normas do Eurocódigo 3. Com a nova metodologia proposta, é analisado o comportamento global do elemento representativo de um segmento da alma da viga alveolar ao invés da alma do Tê. Espera-se que, salvo excessões onde a existência da abertura altera o modo de encurvadura elástica, conforme é aumento o diâmetro do furo, é diminuída a tensão crítica

de encurvadura. Com isso, são obtidas as esbeltezas normalizadas dos elementos, as quais comparadas com os limites da classificação mostradas na Tabela 15 tornam possível a classificação da secção transversal analisada.

É apresentada uma comparação entre a nova proposta e o método de classificação do Eurocódigo no conjunto de figuras deste a Figura 53 até a Figura 56. Nestas imagens, são plotados os pontos referentes à diferentes rácios de d_0/H_w , onde a classe segundo o Eurocódigo 3 é mostrada no eixo vertical (C_{EC3}), enquanto a proposta de reclassificação é dada no eixo horizontal, intitulada de nova proposta (C_{NP}). Sabe-se que o Eurocódigo 3 não considera a distância entre as aberturas na classificação, porém a nova metodologia numericamente traz esse parâmetro incorporado em suas equações. Para tal, são gerados quatro conjuntos de figuras, cada qual para uma esbelteza geométrica fixa, de acordo com o perfil IPE escolhido, variando o rácio entre L/H_w , onde L representa a distância entre furos e H_w a altura da alma da viga, desconsiderando os raios de concordância. Os pontos que estão sobre a linha diagonal chama de transição (Tr) indicam que a classificação segundo a nova metodologia é a mesma dada pela norma. O deslocamento horizontal dos marcadores indica uma mudança de classe segundo a nova proposta. Da mesma forma, deslocamentos verticais indicam mudança na classificação segundo o Eurocódigo 3.

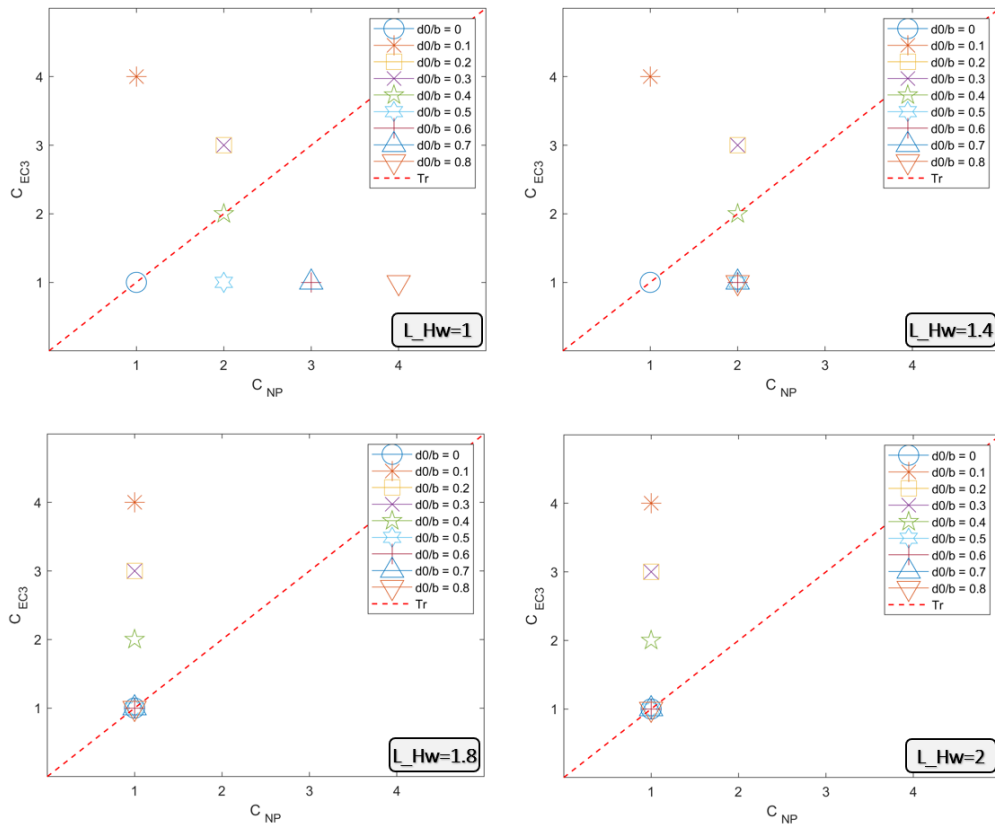


Figura 53 – Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE160.

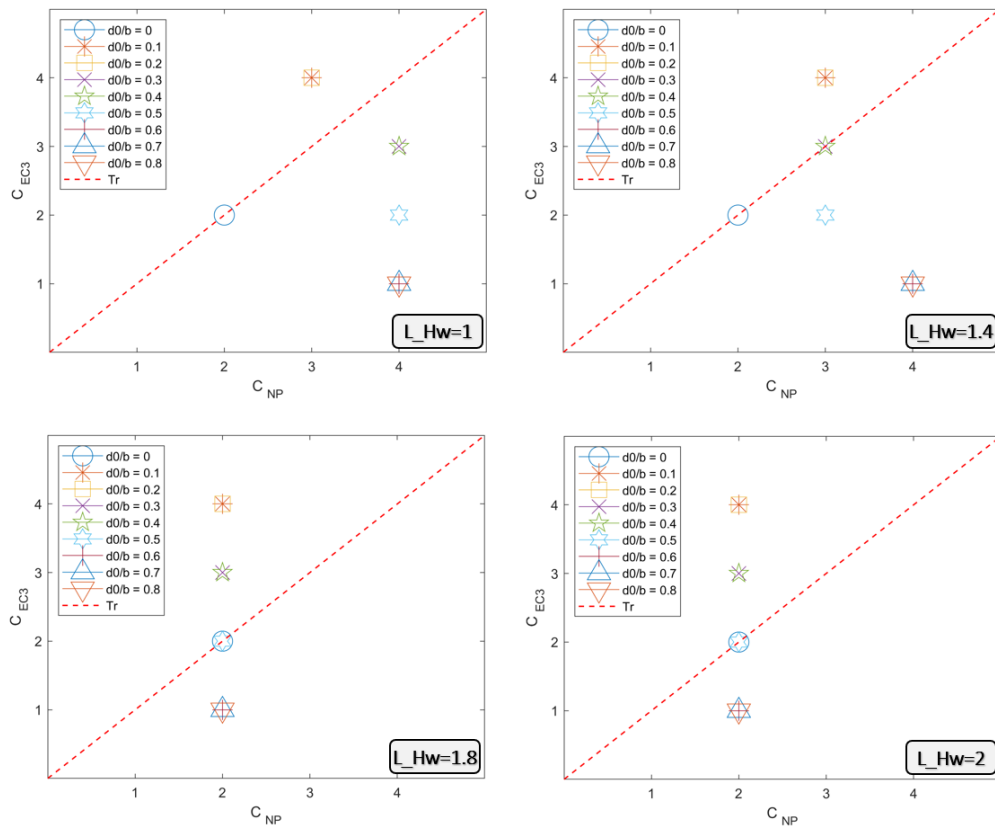


Figura 54- Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE240.

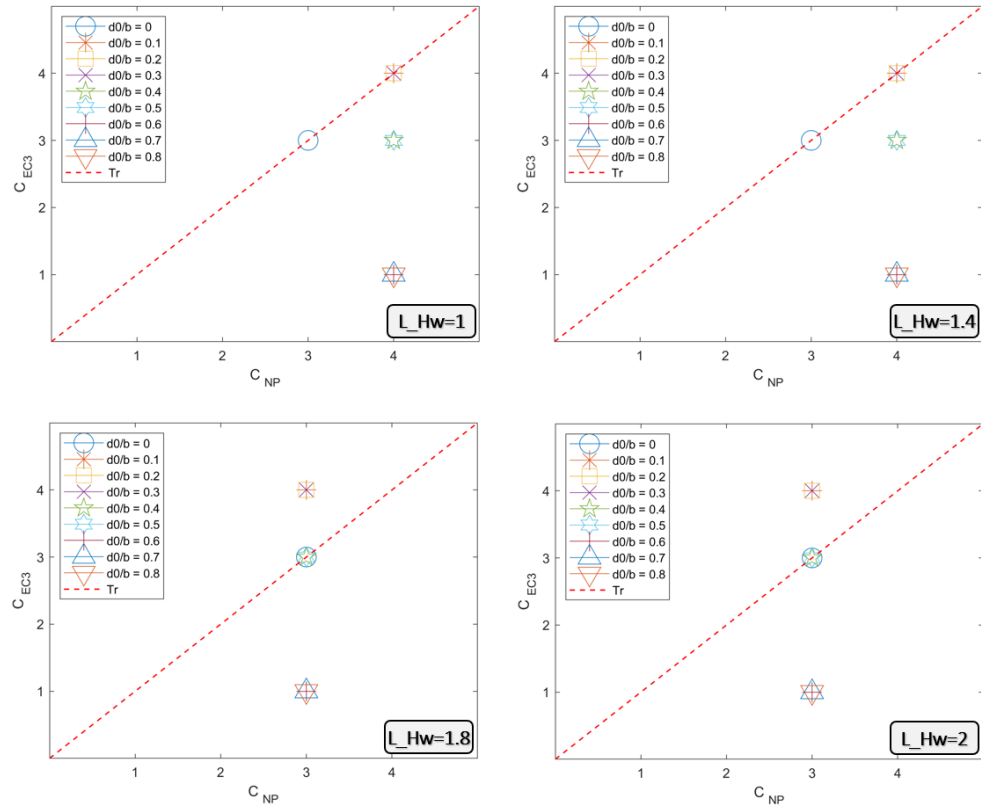


Figura 55 - Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE270.

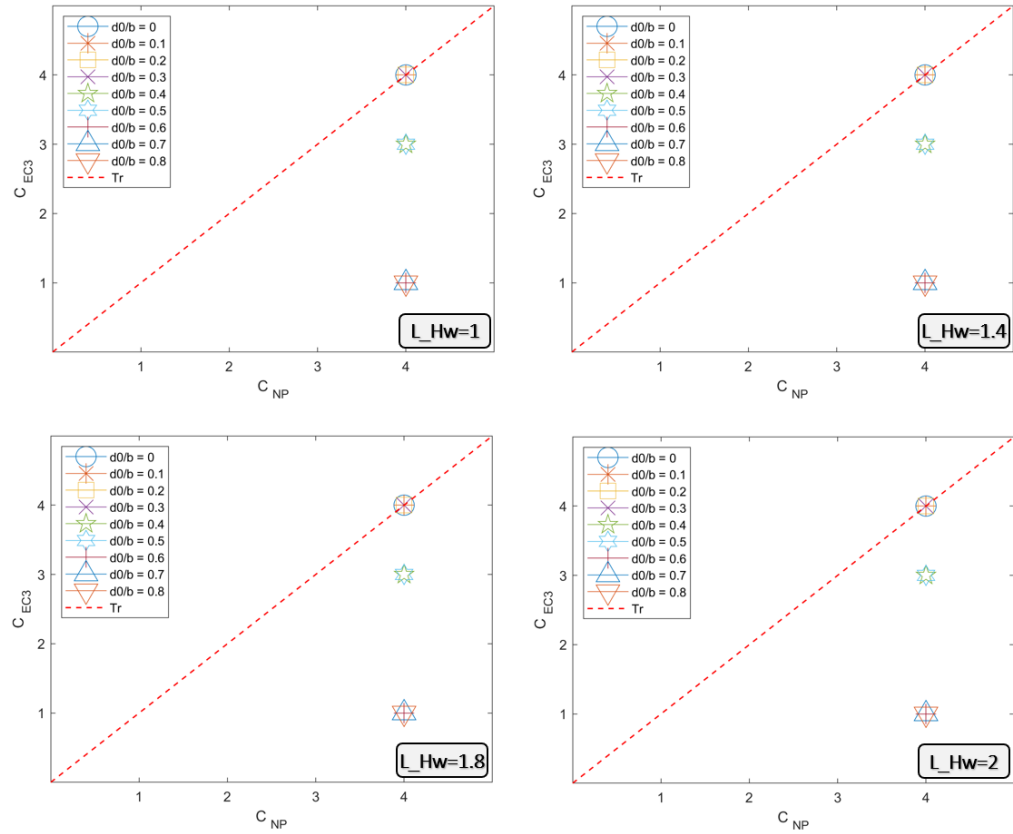


Figura 56 - Classificação das secções de acordo com as duas abordagens para IPE300.

5.4 Verificação da aplicabilidade da proposta

Sabe-se que a teoria de encurvadura elástica de placas é utilizada pelo Eurocódigo 3 para delimitação das classes de secções transversais. Porém, sabe-se também que o material tem um comportamento bastante variado do considerado em análises no regime linear elástico. Para quantificar de forma mais concreta a proposta apresentada, são executadas simulações não lineares para realizar a verificação do instante de colapso, caso este ocorra no regime plástico.

Como forma de verificar a carga última resistente pelo elemento de placa, são executadas simulações numéricas não lineares, levando em consideração a cessação do regime linear. Para tal, é usado o modelo de comportamento de material descrito no Anexo C do Eurocódigo 1993-1-5, [23], intitulado de bi-linear, como mostrado na Figura 57. Neste modelo, o material tem um comportamento elasto-plástico sem a ocorrência de endurecimento.

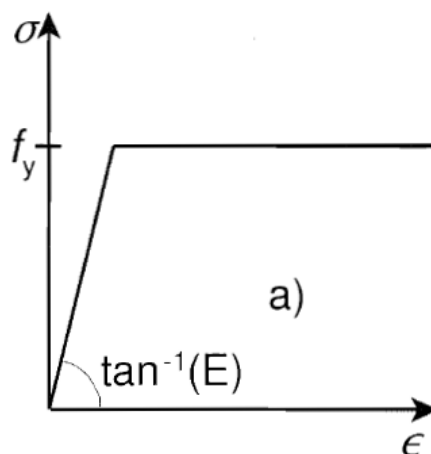


Figura 57 – Comportamento elasto-plástico sem endurecimento, [23].

Foi escolhido a utilização do modelo de material chamado de bi-linear sem endurecimento uma vez que esta escolha nivela a análise com o maior nível de segurança possível. Segundo o Eurocódigo 3-1-5, [23], é possível a utilização de outros modelos de comportamento de material como mostrado na Figura 58. A parte a) desta figura mostra o material com comportamento bi-linear, sem endurecimento; parte b) uma pequena porção de endurecimento dependente do módulo de elasticidade (E); parte c) há endurecimento na ordem de $E/100$ e na parte d) é representado o modelo de comportamento real do material.

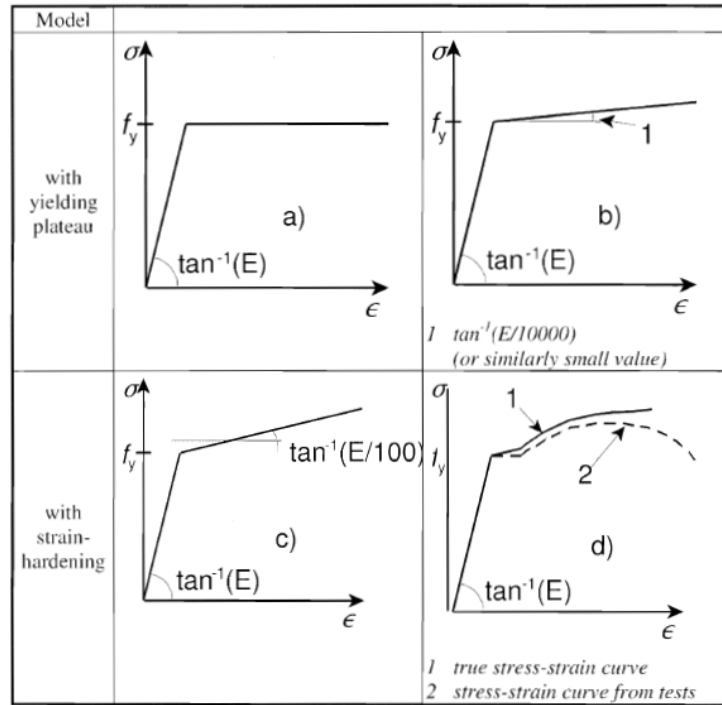


Figura 58 – Modelos recomendados pelo Eurocódigo 3 para comportamento dos materiais, [23].

Ainda no Anexo C da norma citada, são recomendadas imperfeições para utilização em elementos de placa. Os elementos utilizados neste trabalho são tratados com painéis e sub-painéis, os quais a norma recomenda uma análise utilizando apenas imperfeições geométricas. Ainda, a forma de geometria recomendada é um formato de encurvadura, como mostrado na Figura 59 com magnitude:

$$e_{0w} = \min\left(\frac{H_w}{200}; \frac{L}{200}\right) \quad (65)$$

Como a placa analisada é quadrada, o valor será o mesmo.

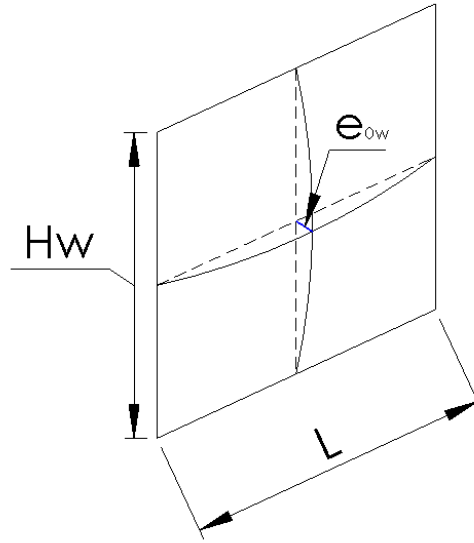


Figura 59 – Imperfeição geométrica aplicada.

Como precedência às análises não lineares, é feito um estudo do comportamento elástico dos perfis utilizados de modo a encontrar o máximo deslocamento produzido pela encurvadura elástica, posteriormente atualizando a geometria da estrutura levando em consideração à imperfeição descrita. O material utilizado continua sendo o aço S355. Ainda, o incremento de carga utilizado foi de $q = 10\,000t_i$.

A discretização por elementos finitos produz um conjunto de equações que devem ser simultaneamente resolvidas, regidas pela Equação (66):

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (66)$$

Onde $[K]$ é a matriz de coeficientes; $\{u\}$ vetor dos valores de graus de liberdade e $\{F^a\}$ o vetor das forças aplicadas. Como a matriz de coeficientes $[K]$ é uma função dos valores desconhecidos de graus de liberdade ou de suas derivadas, a Equação (66) é uma equação não linear. O método utilizado para solução do problema não linear foi o Método Incremental de Newton-Raphson, o qual consiste nas seguintes expressões:

$$[K_{n,i}^T]\{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (67)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (68)$$

Onde $[K_{n,i}^T]$ é a matriz jacobiana para o incremento de tempo n ; o subíndice i representa a iteração; $\{F_n^a\}$ representa o vetor total das forças aplicadas no incremento de tempo n e $\{F_{n,i}^{nr}\}$ o vetor de restauração das cargas, [33].

Este procedimento incremental e iterativo é mostrado na Figura 60. O método de Newton-Raphson garante convergência se, e somente se, a solução a cada iteração $\{u_i\}$ está próxima da solução exata, [33].

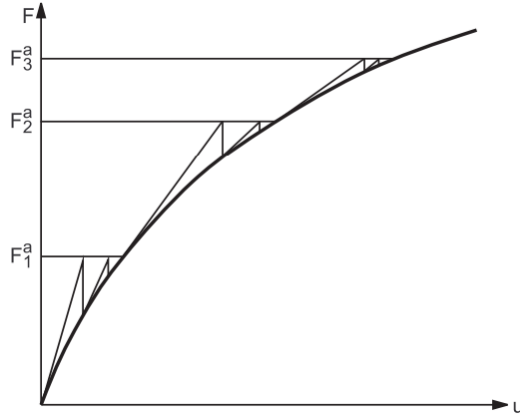


Figura 60 – Procedimento incremental e iterativo de Newton-Raphson, [33].

Em um primeiro momento, as condições de fronteira são mantidas idênticas às utilizadas para o modelamento elástico. No entanto, verificou-se que a distribuição das tensões no instante de colapso não se apresentavam simétricas, pelo que foram aplicadas duas condições de simetria na placa as quais são mostradas na Figura 62. A tensão equivalente de Von-Mises, para o perfil IPE160 com abertura $d_0 = 0,6H_w$ é mostrada na Figura 61.

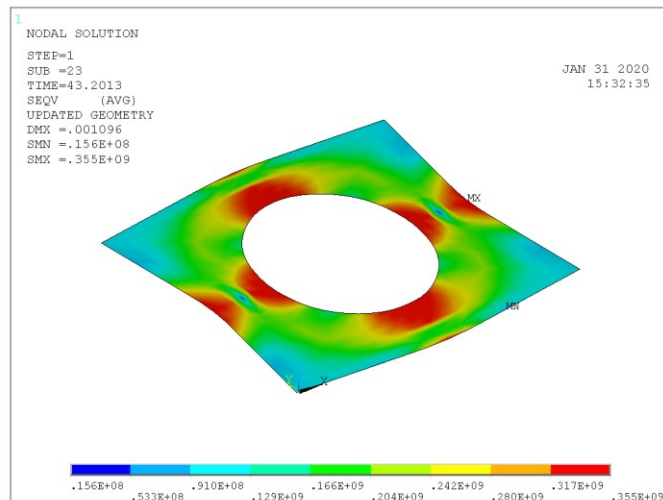


Figura 61 – Resultado de distribuição da tensão de Von-Mises para IPE160.

A malha criada utilizando o *Software Ansys Mechanical APDL* é mostrada na Figura 62 com um tamanho de elemento de 10mm, tamanho utilizado em todas as análises não lineares. Além do apoio simples em todos os bordos, são representadas as demais condições de contorno utilizadas. Ainda, é indicado o nó posicionado à meia altura da placa, o qual tem seu deslocamento linear registrado na direção do eixo x. Para concordância do modelo, o esforço compressivo que anteriormente atuava apenas em um dos lados da placa, agora atua de maneira igualitária na linha projetada pelo eixo vertical de simetria desta. A carga é aumentada numa taxa de $q = 10\,000t_i$ até o instante de colapso, registrando o deslocamento axial do nó posicionado à altura $H_w/2$ e a distribuição da tensão equivalente de Von-Mises.

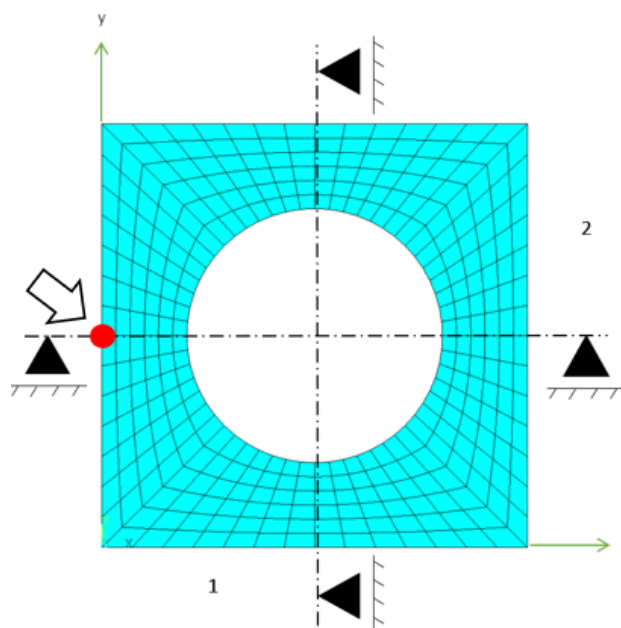


Figura 62 – Limitações de deslocamento atualizadas para os eixos x e y.

5.5 Carga de colapso de placas à compressão

Como já mencionado anteriormente, a escolha das diferentes vigas IPE se deu pela possibilidade de analisar vigas que, quando sólidas, possuem esbeltezas geométricas da alma que classificam o elemento em diferentes classes, de 1 a 4. Os casos estudados são mostrados na Tabela 17 – Casos de estudo não lineares. Tabela 17.

Tabela 17 – Casos de estudo não lineares.

Perfil	Classe	L/H_w	d_0/H_w
IPE160	1	1	[0:0,1:0,8]
IPE240	2	1	[0:0,1:0,8]
IPE270	3	1	[0:0,1:0,8]
IPE300	4	1	[0:0,1:0,8]

5.5.1 Viga IPE160

O primeiro perfil analisado é o IPE160, o qual originalmente possui uma alma de classe 1. Suas propriedades geométricas não mostradas na Tabela 18. Na Figura 63 são mostrados os deslocamentos axiais do nó posicionado à uma altura $H_w/2$ no elemento de placa em função da carga aplicada para os diferentes diâmetros. É possível notar ainda que a presença de uma abertura altera a resposta do elemento à esforços axiais com relação não linear a variações no diâmetro.

Tabela 18 – Dimensões da viga IPE160.

Parâmetro	Medida (mm)
Altura - H	160
Espessura do banzo - t_f	7,4
Espessura da alma - t_w	5
Raio de concordância - r	9
Largura do Banzo - b_f	82

A esbelteza geométrica do elemento H_w/t_w é calculada conforme a Equação (69), considerando a secção transversal total deste.

$$H_w/t_w = \frac{H - 2 * (t_f + r)}{t_w} \quad (69)$$

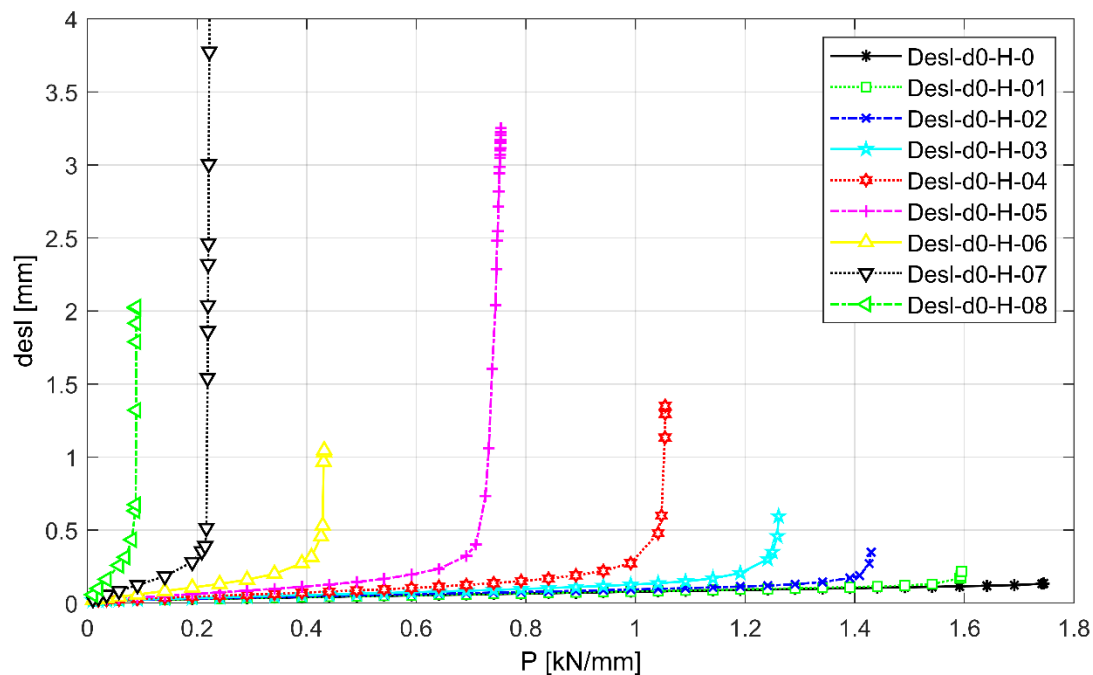


Figura 63 – Deslocamentos em função da carga aplicada para IPE160.

Percebe-se uma clara tendência assintótica instantes precedentes ao colapso, o que significa que um pequeno incremento de carga causa um grande deslocamento, provocando a perda da estabilidade deste. É chamada atenção ao comportamento da placa para o caso onde $d_0 = 0,7 * H_w$, em que há um deslocamento superior aos demais diâmetros até o instante do colapso. Na Figura 64 é mostrado o modo de colapso deste elemento para vários diâmetros diferentes do furo. Os demais diâmetros são apresentados no Anexo A5.

Para diâmetros menores, o elemento de placa suporta uma tensão compressiva maior até seu colapso, de modo que a instabilidade do elemento ocorre com uma pequena tensão aplicada quando o furo é muito grande.

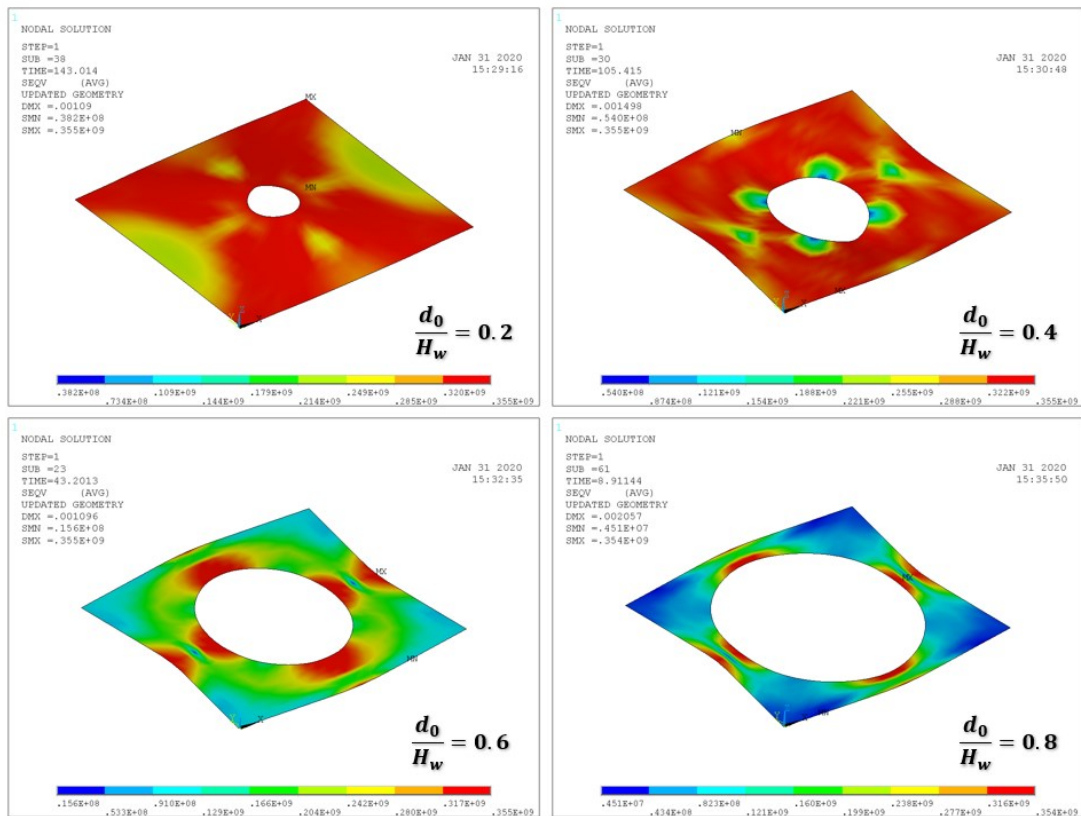


Figura 64 – Distribuição de tensões no instante do colapso: IPE160

5.5.2 Viga IPE240

Este perfil possui uma alma sólida de classe 2. Suas dimensões geométricas são mostradas na Tabela 19.

Tabela 19 – Dimensões da viga IPE240.

Parâmetro	Medida (mm)
Altura - H	240
Espessura do banzo - t_f	9,8
Espessura da alma - t_w	6,2
Raio de concordância - r	15
Largura do Banzo - b_f	120

De maneira semelhante, são mostrados os deslocamentos em função da carga aplicada para os diâmetros analisados na Figura 65. Percebe-se uma menor deformação do elemento

de placa até o instante do colapso quando comparado ao IPE160, embora as configurações de diâmetro de 0,5 e 0,6 da altura da placa suportem maiores deslocamentos quando comparados aos demais diâmetros.

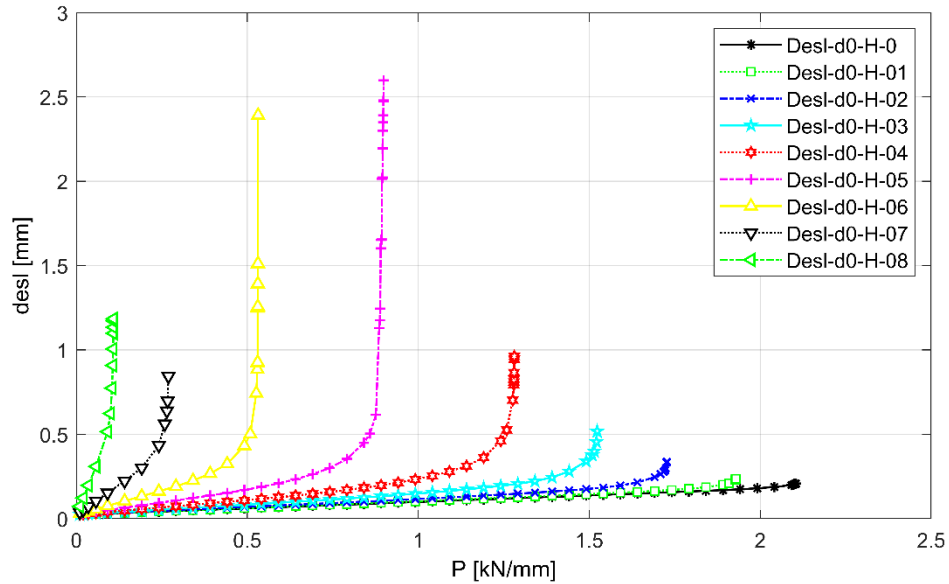


Figura 65 – Deslocamentos em função da carga aplicada para vários diâmetros da viga IPE 240.

A distribuição de tensões de Von-Mises é mostrada na Figura 66. Percebe-se mais uma vez que quanto maior o diâmetro da abertura menor é a tensão que provoca o colapso do componente. Outros diâmetros estudados são mostrados no Anexo A5.

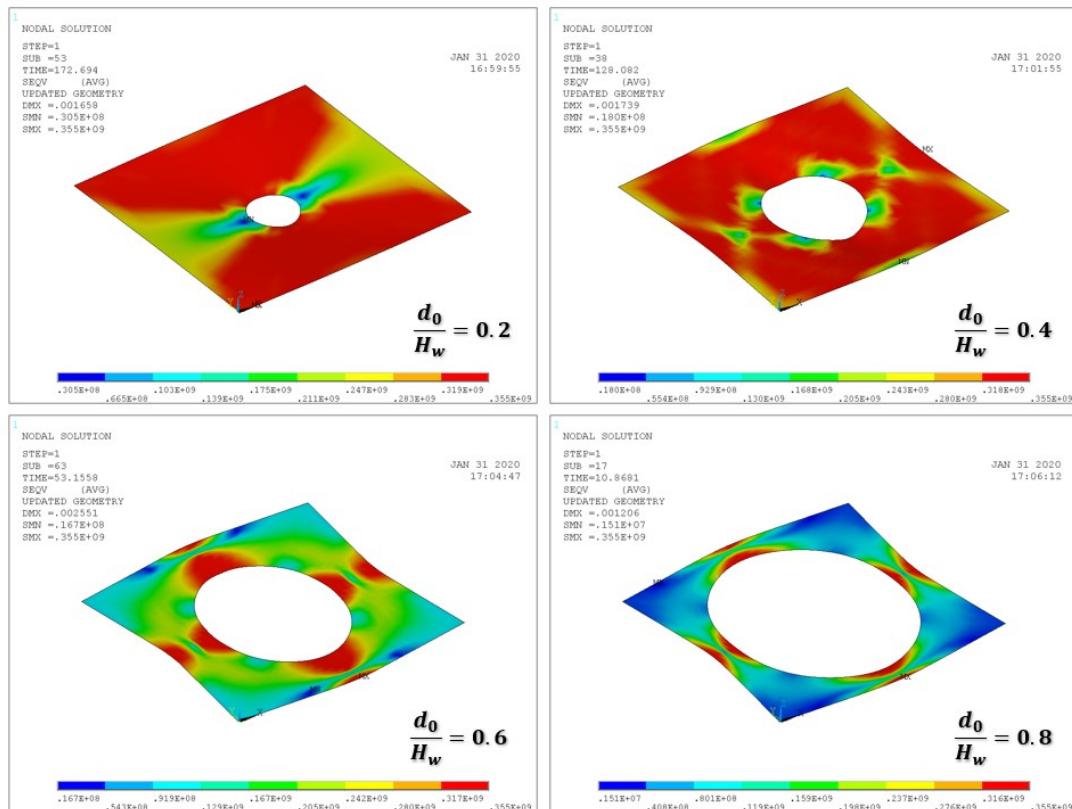


Figura 66 – Modo de colapso da viga IPE240 com diferentes diâmetros.

5.5.3 Viga IPE270

Sem a presença de abertura, o perfil IPE270 possui uma alma de classe 3. Percebe-se que pela definição de classe 3, estes elementos devem ser projetados levando em consideração a permissão de atingir apenas uma distribuição elástica de tensões. As características geométricas da viga são mostradas na Tabela 20.

Tabela 20 – Dimensões da viga IPE270.

Parâmetro	Medida (mm)
Altura - H	270
Espessura do banzo - t_f	10,2
Espessura da alma - t_w	6,6
Raio de concordância - r	15
Largura do Banzo - b_f	135

O comportamento de deslocamentos em função da carga aplicada é mostrado na Figura 67. Percebe-se que o deslocamento até o instante do colapso vem sendo diminuído conforme aumenta a esbelteza geométrica do elemento. Embora exista um padrão aproximadamente linear entre o diâmetro da abertura e a carga no instante de colapso, não se pode dizer o mesmo sobre os deslocamentos.

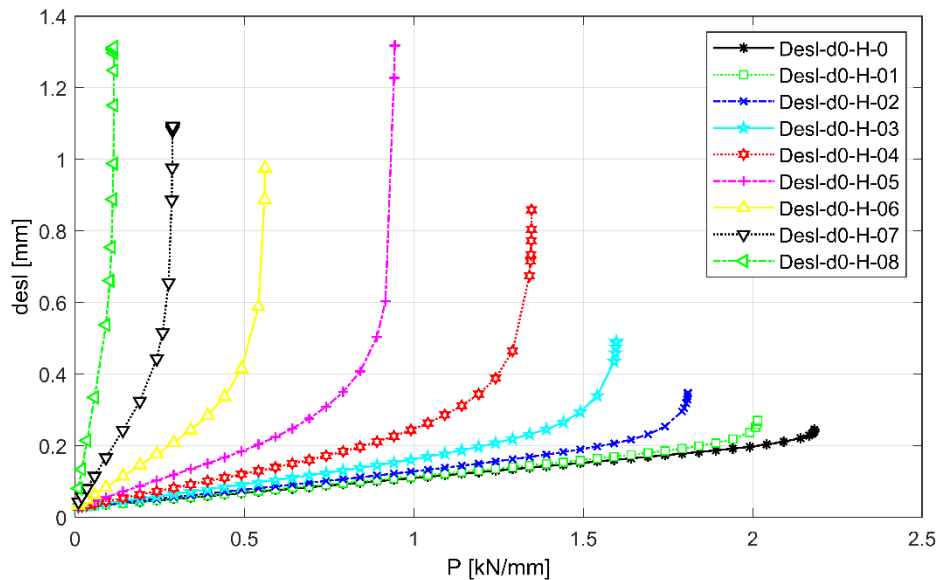


Figura 67 – Deslocamentos em função da carga para vários diâmetros: viga IPE270.

Na Figura 68 são mostradas as distribuições de tensões para a viga em questão de acordo com vários diâmetros de aberturas. Os demais diâmetros são dados no Anexo A5.

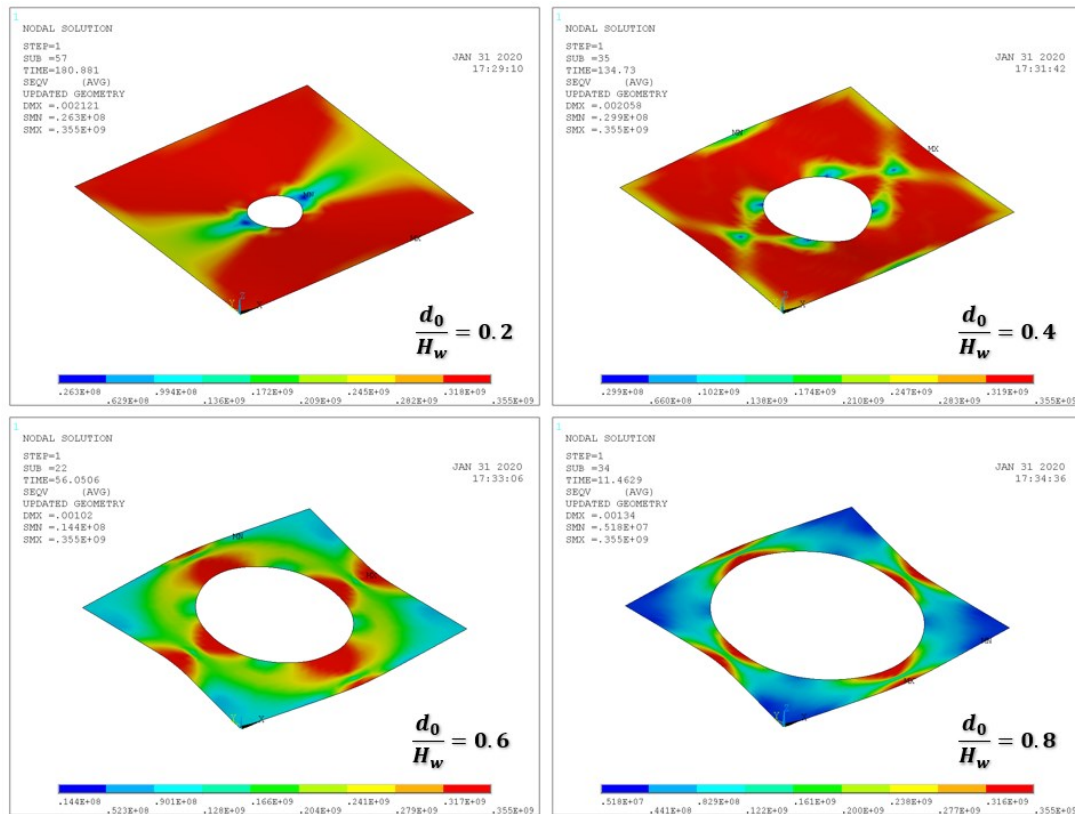


Figura 68 – Distribuição de tensões no instante de colapso para viga IPE270.

5.5.4 Viga IPE300

Tendo uma alma sólida de classe 4, essa classificação de elementos apresenta muitas particularidades que devem ser levadas em consideração durante em seu projeto, uma vez que a falha por encurvadura ocorre antes de qualquer porção do material atingir a tensão de cedência. Quaisquer elementos IPE com altura acima de 300mm automaticamente são de classe 4 sob compressão. As dimensões deste perfil são mostradas na Tabela 21

Tabela 21 – Dimensões da viga IPE300.

Parâmetro	Medida (mm)
Altura - H	300
Espessura do banzo - t_f	10,7
Espessura da alma - t_w	7,1
Raio de concordância - r	15
Largura do Banzo - b_f	150

São mostrados os deslocamentos em função da carga aplicada na Figura 69. Percebe-se que, comparando os dados com os respectivos obtidos para a viga IPE270, a qual originalmente tem esbelteza geométrica que a classifica na classe 3, a IPE300 permite por vezes um deslocamento superior até o instante do colapso, mesmo tendo secção original de classe 4.

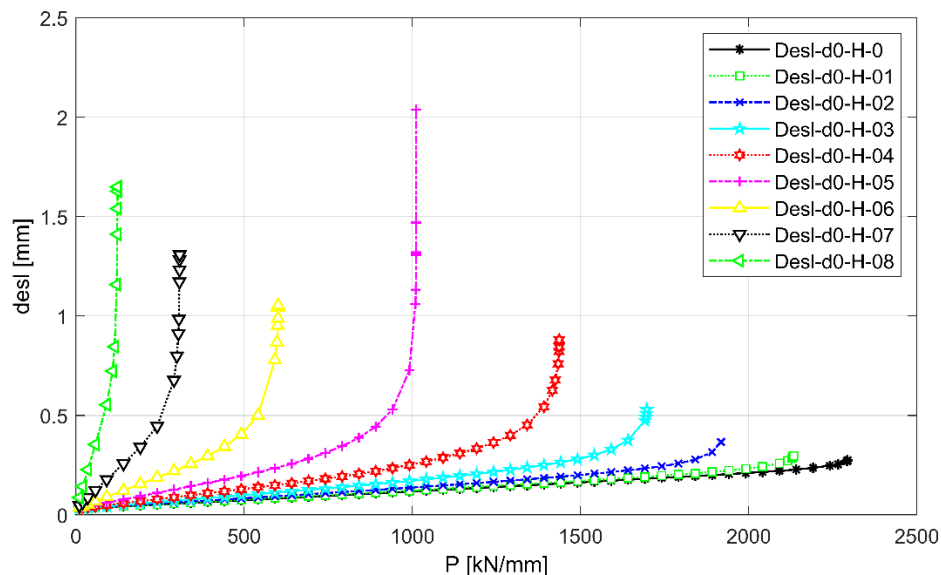


Figura 69 – Deslocamentos em função da carga aplicada para a viga IPE300.

Ainda, um aspecto comum em todos os perfis analisados é que quando a abertura apresenta um diâmetro igual a metade da altura da placa os deslocamentos permitidos até o instante do colapso são superiores.

A Figura 70 apresenta a distribuição de tensões da viga analisada comportando diferentes diâmetros, sendo os demais apresentados no Anexo A5. Com uma breve análise é possível identificar as semelhanças no instante de colapso para as vigas classificadas em 3 e 4.

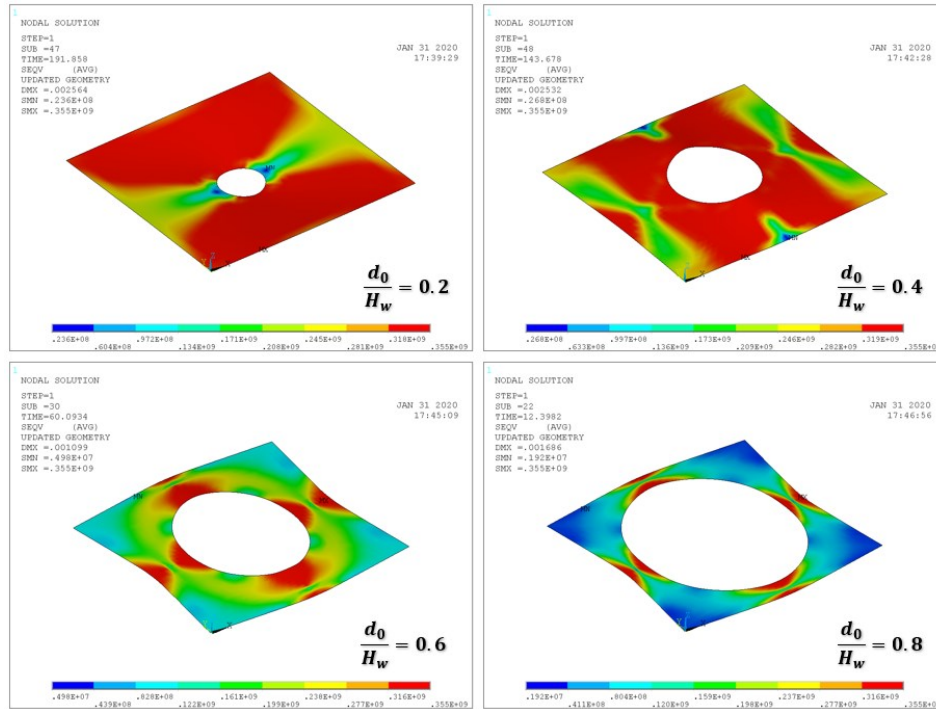


Figura 70 – Distribuição de tensões de Von-Mises para a viga IPE300.

5.6 Tensão última dos elementos e esbelteza normalizada

Uma vez tendo a carga de colapso dos elementos de placa é possível transformá-la em tensão atuante. Como tem-se a carga aplicada de forma distribuída nos bordos da placa, fazendo a divisão desta pela espessura do elemento é obtida a tensão aplicada. Esta tensão é chamada de tensão última, tendo como símbolo σ_u .

Para placas com diâmetros de aberturas menores, nota-se que a tensão atuando no elemento no sentido transversal à aplicação da força é menor próximo à região do furo. Para garantir que a região à plastificar seja sempre a menor secção transversal, o Eurocódigo 3-1-5, [23], recomenda que a tensão seja aplicada em apenas um dado comprimento na linha como mostrado na Figura 71 – a). Os comprimentos b_{e1} e b_{e2} são iguais para secções sob compressão e são calculados com base na esbelteza geométrica do elemento comprimido. O desenvolvimento matemático proposto pela norma é válido apenas para secções tranvesais sólidas. Essa redução na área de aplicação do esforço deve ser reduzida para casos onde a esbelteza geométrica do elemento $\bar{\lambda}_p$ é superior à dada pela Equação (70).

$$\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (70)$$

Onde $\psi = 1$ para a condição de carregamento analisada. A metodologia trazida pela norma é aplicável somente à casos em que não há abertura no elemento de placa, portanto, não é utilizada neste trabalho. A investigação e recomendação desta utilização mostra a diminuição da capacidade de suportar tensão da placa em suas linhas médias, o que explica as tensões menores nesta região obtidas pelas simulações numéricas não lineares realizadas. O comportamento das tensões nas linhas sob compressão é mostrado por Selamet et al, [24], na Figura 71 – b) em acórdância com o Eurocódigo 3-1-5, [23].

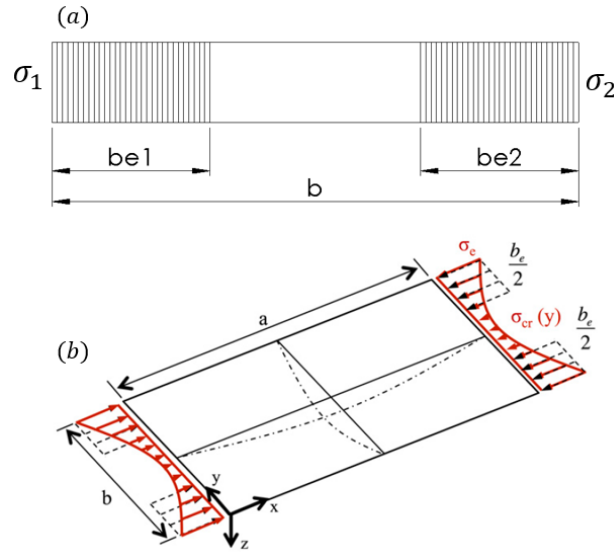


Figura 71 – a) Recomendação de aplicação da tensão em elementos de placa conforme Eurocódigo 3-1-5, [23]; b) Distribuição de tensões na linha e comportamento de pós encurvadura para elementos enrijecidos, [24].

Uma forma clássica de representar a tensão última, σ_u , é deixando-a em função da esbelteza normalizada do elemento. Esta representação é mostrada na Figura 72 para os quatro perfis utilizados, nomeadamente IPE160, IPE240, IPE270 e IPE300.

Essa representação consiste na divisão de cedência do material (f_y) pela sua tensão última (σ_u), representada no eixo vertical em função da esbelteza normalizada do elemento ($\bar{\lambda}_p$) dada por:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cri}}} \quad (71)$$

Onde σ_{cri} representa a tensão crítica à encurvadura elástica do material, podendo ser obtida pela formulação matemática para elementos sólidos ou através do método analítico resultante da análise dos resultados obtidos pelo MEF apresentados no Capítulo 4:. Ainda, é plotada a curva de encurvadura elástica de Euler como referência, indicada na legenda como C_{Eu} .

Analizando o comportamento elasto-plástico dos perfis é possível notar que, a normalização da tensão última na região da abertura pela tensão de cedência coloca os pontos com diâmetros menores em uma linha na altura da unidade, ligeiramente inferior quando os elementos possuem classes 3 ou 4, decaindo rapidamente a partir de diâmetros superiores a $d_0/H_w \geq 0,5$ da altura para todos os casos.

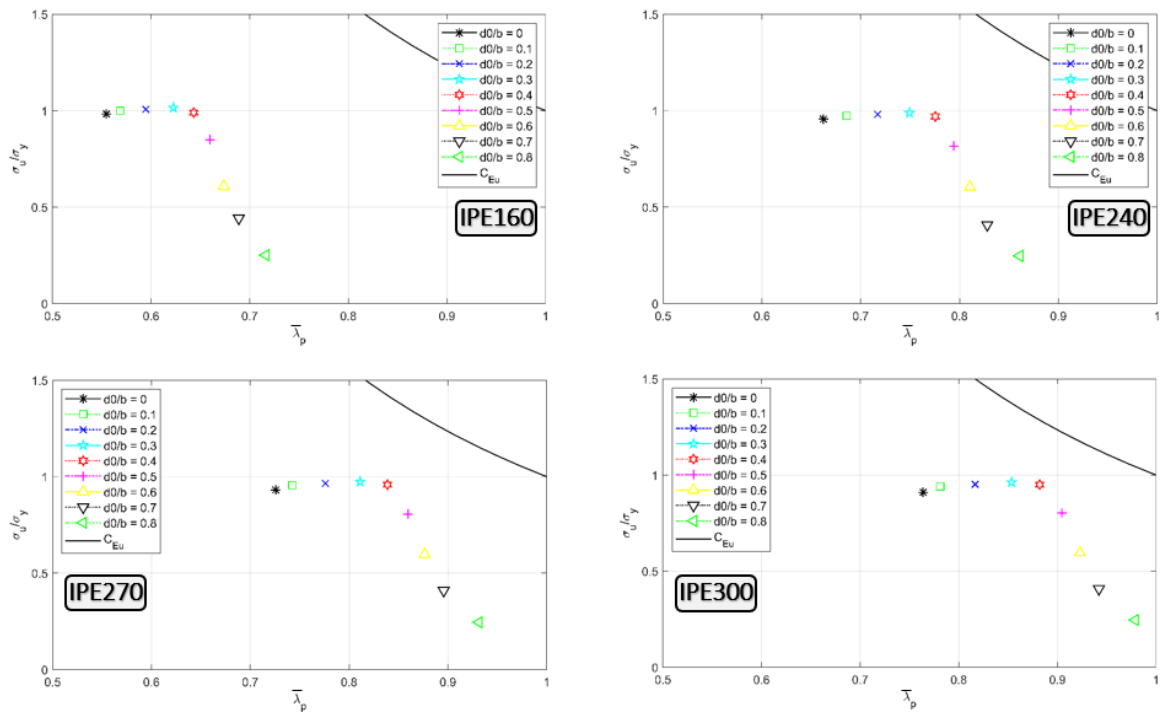


Figura 72 – Tensão última σ_u dos perfis analisados normalizados pela tensão de cedência em função da esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_p$.

Como pode ser analisado da Figura 72, a nova metodologia proposta apresenta uma melhor correspondência nos resultados quando comparados ao Eurocódigo 3. Para diâmetros de aberturas menores, a capacidade de o elemento de placa suportar tensão é maior, como pode ser verificado a disposição de pontos próximo a linha unitária, estando ligeiramente acima para classes 1 e 2 e abaixo para 3 e 4. Os resultados apresentam uma boa correspondência à metodologia de classificação proposta no Capítulo 4, salvo o caso onde

$d_0/H_w = 0,5$. Em contrapartida ao explicitado no Eurocódigo 3, placas com grandes diâmetros colapsam por cargas bem abaixo da tensão de cedência do material, caracterizando uma falha precedente à plastificação da secção na região do furo. Neste sentido a metodologia de classificação proposta pelo Eurocódigo 3 é insegura.

Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões gerais

O desenvolvimento do presente trabalho foi baseado nos conceitos de vigas alveolares. Embora o membro estrutural não tenha sido analisado por completo, foi realizado a análise de um segmento desta utilizando das suas características geométricas. O objetivo foi investigar a fundo a metodologia proposta pelo Eurocódigo 3 para realizar a classificação dos elementos e propor uma nova metodologia.

A proposta de norma do Eurocódigo 3-1-13, [2], traz métodos simplificados para a classificação dos elementos, levando em consideração apenas a classificação do banzo. Para isso, uma parte da alma deveria ser desprezada caso fosse de comprimento superior ao limite da classificação para elementos externos. Há duas perspectivas possíveis para interpretação dessa condição: a primeira delas é o desperdício de material, uma vez que, para projeto, é considerado menos material do que realmente existe e a outra é que o elemento considerado terá aumentada sua resistência à encurvadura. Isso ocorre visto que o Eurocódigo 3 defende que quanto menor o seu comprimento – e consequentemente maior esbelteza geométrica – menor este estará susceptível à ocorrência de encurvadura, em acórdância com a teoria de encurvadura elástica para placas finas.

Para verificar a veracidade e consequências dessa imposição, é criado um modelo numérico no *Software Ansys Mechanical APDL* capaz de simular a alma de uma viga. Inicialmente o modelo considerado é sólido, de modo a fazer a calibração deste com o desenvolvimento matemático para uma placa quadrada. São variadas esbeltezas geométricas b/t de 20 até 140, tendo erros abaixo de 6%. Um segundo momento o modelo de alma é atualizado para comportar o furo da viga alveolar, sendo novamente simulado com diferentes esbeltezas e rácios entre diâmetro da abertura e altura total da placa, variando entre 0 e 0,8 com resolução de 0,1.

Os resultados das simulações numéricas são analisados utilizando o *Software* MATLAB. Foi percebido que normalizando a tensão crítica à encurvadura de uma placa com abertura pela tensão crítica matemática da placa sólida, pode-se obter um equacionamento capaz de descrever a tensão crítica de uma placa com abertura central como função do rácio entre diâmetro da abertura e altura total da placa aplicável a qualquer esbelteza geométrica b/t com erros inferiores à 6%.

Pela consideração obtida no parágrafo anterior, é mantida essa condição de normalização e são realizadas novas simulações, variando o diâmetro da abertura e também o comprimento da placa – que representa o espaçamento entre as aberturas. Como resultado, são obtidas duas equações capazes de descrever a tensão crítica de encurvadura elástica para elementos de placa com furo central, dependente das variáveis relacionadas à esbelteza geométrica, comprimento da placa e diâmetro da abertura. Salvo raras excessões, os erros se mantêm abaixo de 8% no intervalo estudado.

Obtendo a tensão crítica de um elemento de placa com furo, é possível obter sua esbelteza normalizada através da equação correspondente à definição desta. Fazendo uma tradução das esbeltezas geométricas dadas pelo Eurocódigo 3 em esbeltezas normalizadas, são obtidos valores para transição de classes, sendo assim possível classificar os elementos em função de esbeltezas normalizadas, tornando possível a comparação dos resultados numéricos com os normatizados.

É proposta uma nova metodologia de classificação dos elementos, não mais levando em consideração apenas o elemento representativo à alma do Tê, como o Eurocódigo 3 recomenda, mas sim levando em consideração todo o elemento da alma da viga alveolar com comprimento igual ao espaçamento entre as aberturas. Os resultados numéricos se mostraram na contramão dos propostos pelo Eurocódigo 3, uma vez que aumentando o diâmetro da abertura, este considera uma diminuição da alma do Tê e consequentemente um aumento da sua carga de colapso, enquanto as simulações numéricas mostraram que quanto maior a abertura em um elemento de placa completo sujeito a compressão, menor é a capacidade de resistência deste.

São escolhidos 4 perfis de vigas, IPE160, IPE240, IPE270 e IPE300, os quais representam cada uma das 4 classes possíveis. São plotados gráficos que mostram a influência da presença de aberturas na classificação dos elementos de acordo com a nova proposta e de acordo com o Eurocódigo 3 para comprimentos de placa de 1 a 2 vezes sua

altura. Em todos os casos, ambas as abordagens mostram a mesma classificação para elementos sólidos.

Por fim, são consideradas imperfeições geométricas no material de acordo com o Eurocódigo 3-1-5, [23], realizando simulações numéricas não lineares para o caso de uma placa quadrada ainda utilizando o *Software Ansys Mechanical APDL*. São obtidos dados sobre deformações do elemento em função da carga para os vários diâmetros estudados, todos mostrando comportamento assintótico instantes antes do colapso. Ainda, é concluído que, embora a carga de colapso é sempre maior quanto menor o diâmetro da abertura, a deformação do elemento não segue um padrão linear, obtendo-se maiores deformações normalmente para placas com diâmetro do furo igual à metade da altura total da placa. Pode ser verificado esta rápida diminuição da resistência também durante a normalização da tensão última pela tensão de cedência, tornando possível uma visualização do rápido decrescimento da resistência para diâmetros maiores superiores à $d_0 \geq 0,5H_w$. A nova metodologia de classificação proposta apresenta uma melhor correspondência ao modelo numérico não linear criado, ao passo que reforça que o Eurocódigo 3 apresenta metodologia insegura. Para almas sólidas de classes 1 e 2, é possível o dimensionamento no regime elástico até $d_0 = 0,4H_w$, instante em que a normalização da tensão de colapso na abertura pela tensão de cedência decresce rapidamente, em contrapartida à norma, a qual recomenda a diminuição da classificação (de uma classe maior para uma menor) conforme é aumentado o diâmetro de uma abertura.

Conforme esperado, a análise global do elemento e não apenas da alma do Tê mostra que a existência de uma abertura diminui a tensão de colapso deste. Para tal, aberturas menores, conforme a classificação proposta, podem ser dimensionadas no regime plástico, enquanto as maiores devem ser dimensionadas no regime elástico. Para uma melhor calibração do modelo numérico, seria interessante a realização de estudos experimentais.

Por fim, a existência de uma abertura em um elemento de placa comprimido axialmente altera significativamente a resistência deste ao fenômeno de encurvadura. Dependendo as configurações de diâmetro da abertura e comprimento da placa, a existência de um furo pode substancialmente diminuir a resistência do elemento, mas também pode aumentá-la, uma vez que pode provocar alterações do número e comprimento de semi-ondas de encurvadura. É comum que a existência de aberturas gere modos de falha únicos.

6.2 Linhas futuras de investigação

Uma vez pesquisado mais a fundo sobre um tema que aparentava estar completamente desenvolvido, percebe-se a carência de estudos menos simplificados sobre os perfis metálicos de vigas alveolares. Nesse sentido, propõe-se atenção aos seguintes temas:

1. Desenvolver formulação de classificação para elementos com abertura central sujeitos a momento fletor; embora o caso mais crítico para encurvadura seja um elemento com toda a secção transversal sob compressão, as vigas alveolares tem uma utilização mais comum sob carregamento de flexão. Desenvolvendo este tópico, é possível estender o campo de aplicação da nova metodologia de dimensionamento.
2. Aprofundar o estudo realizado para o caso de o elemento estar sujeito a diferentes temperaturas decorrentes de situações de incêndio. Existem muitos estudos que mostram comportamentos bastante específicos quando o aço está sujeito a temperaturas elevadas. A degradação do aço devido ao calor pode provocar um colapso prematuro e inesperado da estrutura, desta forma, é interessante que este comportamento seja estudado.
3. Estudar a interação entre alma e flange e influência na classificação da secção transversal. Por estarem acoplados ao longo das linhas comuns, é esperado que haja uma intensa interação entre os modos de encurvadura dos elementos, alterando a capacidade resistiva de toda a secção transversal e, desta forma, regindo a possibilidade de dimensionamento desta no regime plástico ou elástico.

Referências

1. Erdal, F. and M.P. Saka, *Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2013. **80**: p. 355-368.
2. CEN, *EN 1993-1-13: Draft Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-13 Steel beams with large web openings*, in *European standards*. 2017: Berlin, Germany.
3. AcelorMittal, *The intelligent solution for long spans*. 1996, FSC: Luxembourg. p. 48.
4. ArcelorMittal, *ACB and Angelina beams - A new generation of castellated beams*. Luxembourg.
5. Grilo, L.F., et al., *Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2018. **148**: p. 525-541.
6. R. M. Lawson and HICKS, S.J., *Design of composite beams with large web openings: In accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*, S.C. Institute, Editor. 2011: United Kingdom.
7. Pachpor, P.D., L.M. Gupta, and N.V. Deshpande, *Analysis and Design of Cellular Beam and its Verification*. IERI Procedia, 2014. **7**: p. 120-127.
8. M.E. Brettelle, D.G.B., *Steel Building Design: Concise Eurocodes Steel Construction* Institute, 2009.
9. CEN, *EN 1993-1-1: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules Rules for buildings*, in *European Standards*. 2010: Alcaniça, Portugal.
10. Chen, Y., X. Cheng, and D.A. Nethercot, *An overview study on cross-section classification of steel H-sections*. Journal of Constructional Steel Research, 2013. **80**: p. 386-393.
11. Chung, K.F., T.C.H. Liu, and A.C.H. Ko, *Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings*. Journal of Constructional Steel Research, 2001. **57**(5): p. 467-490.
12. Sonck, D. and J. Belis, *Weak-axis flexural buckling of cellular and castellated columns*. Journal of Constructional Steel Research, 2016. **124**: p. 91-100.
13. Ferreira, F.P.V., A. Rossi, and C.H. Martins, *Lateral-torsional buckling of cellular beams according to the possible updating of EC3*. Journal of Constructional Steel Research, 2019. **153**: p. 222-242.
14. Sonck, D. and J. Belis, *Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2015. **105**: p. 119-128.
15. Zhu, Y. and J. Zhao, *Experimental and numerical study on member classification of I-section plate girders*. Journal of Constructional Steel Research, 2017. **137**: p. 192-200.

16. Rangachari Narayanan, V.K., A.R. Santhakumar, S.Seetharaman, S.R. Satish Kumar, S. Arul Jayachandran, R. Senthil, *Introduction to Plate Buckling*. 2004.
17. Gere, S.P.T.J.M., *Theory of Elastic Stability*. 2 ed. 1963: McGraw-Hill Book.
18. Schafer, B., *Cross-section Stability of Structural Steel*. 2009.
19. Ellobody, E., *Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes*. Thin-Walled Structures, 2012. **52**: p. 66-79.
20. Moen, C.D. and B.W. Schafer, *Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending*. Thin-Walled Structures, 2009. **47**(12): p. 1597-1607.
21. Lima, J.P.S., et al., *Constructal Design for the ultimate buckling stress improvement of stiffened plates submitted to uniaxial compressive load*. Engineering Structures, 2020. **203**: p. 109883.
22. Ziad Haffar, M., B. Kövesdi, and S. Ádány, *On the buckling of longitudinally stiffened plates, part 2: Eurocode-based design for plate-like behaviour of plates with closed-section stiffeners*. Thin-Walled Structures, 2019. **145**: p. 106395.
23. CEN, *EN 1993-1-5: Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements in European standards*. 2006: Brussels.
24. Selamet, S. and E. Garlock Maria, *Plate Buckling Strength of Steel Wide-Flange Sections at Elevated Temperatures*. Journal of Structural Engineering, 2013. **139**(11): p. 1853-1865.
25. El-Sawy, K.M., A.S. Nazmy, and M.I. Martini, *Elasto-plastic buckling of perforated plates under uniaxial compression*. Thin-Walled Structures, 2004. **42**(8): p. 1083-1101.
26. N.S. Trahair, M.A.B., D.A. Nethercot, and L. Gardner, *The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*. Fourth edition ed. 2008: Taylor & Francis Group.
27. Sweedan, A.M.I. and K.M. El-Sawy, *Elastic local buckling of perforated webs of steel cellular beam-column elements*. Journal of Constructional Steel Research, 2011. **67**(7): p. 1115-1127.
28. Normalisation, A.F.d., *Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - et Document d'Application Nationale, in Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*. 2002: Saint-Denis, France.
29. Luís Simões da Silva, R.S., Helena Gervásio, *Design of Steel Structures*. 2013: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork.
30. Clarin, M., *Plate Buckling Resistance - Patch Loading of Longitudinally Stiffened Webs and Local Buckling*, in *Department of Civil, Mining and Environmental Engineering*. 2007, Luleå University of Technology.
31. Quek, G.R.L.S.S., *The Finite Element Method: A Practical Course*. 2003.
32. Oñate, E., *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics*. 2009. **1**.
33. ANSYS, I., *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. 2009.
34. Mathworks, *MATLAB® The Language of Technical Computing*. 2001.

35. ArcelorMittal, *ACB® and Angelina® beams - A New Generation of Cellular Beams*. Luxembourg.
36. ANSYS® Academic Student Mechanical, Versão 2019 R2;
37. SOLIDWORKS® Academic Premium Student Version; Versão 2018;
38. MATLAB® Academic Student Version; Versão R2018a;

Anexos

A1 - Resultados de tensão crítica de encurvadura obtidas numericamente comparando com o modelo matemático

A2 - Resultados de tensão crítica de encurvadura obtidas numericamente

A3 - Encurvadura elástica de placas;

A4 - Tensão crítica obtida numericamente para esbelteza geométrica $H_w/t = 50$;

A5 - Tensão equivalente de Von-Mises obtidas por simulações não lineares com imperfeições geométricas.

A1. Resultados de tensão crítica de encurvadura obtidas numericamente comparando com o modelo matemático

Alma sólida – quadrada

Esbelteza (b/t)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)
20	1794,31	1898,00	5,46
25	1163,95	1214,72	4,18
30	815,23	843,55	3,36
35	602,49	619,75	2,79
40	463,27	474,50	2,37
45	367,24	374,91	2,05
50	298,24	303,68	1,79
55	246,99	250,97	1,59
60	207,90	210,89	1,42
65	177,40	179,69	1,27
70	153,15	154,94	1,15
75	133,55	134,97	1,05
80	117,49	118,62	0,96
85	104,16	105,08	0,88
90	92,97	93,73	0,81
95	83,50	84,12	0,74
100	75,40	75,92	0,69
105	68,42	68,86	0,64
110	62,37	62,74	0,59
115	57,09	57,41	0,55
120	52,45	52,72	0,52
125	48,35	48,59	0,48
130	44,72	44,92	0,45
135	41,48	41,66	0,42
140	38,58	38,73	0,40

Alma sólida – Retangular com comprimento = 2 * largura

Esbelteza (b/t)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)
20	1812,56	1898,00	4,50
25	1173,50	1214,72	3,39
30	820,81	843,55	2,70
35	606,00	619,75	2,22
40	465,61	474,50	1,87
45	368,87	374,91	1,61
50	299,41	303,68	1,40
55	247,87	250,97	1,24
60	208,56	210,89	1,10
65	177,92	179,69	0,99
70	153,56	154,94	0,89
75	133,88	134,97	0,81
80	117,75	118,62	0,74
85	104,37	105,08	0,67
90	93,15	93,73	0,62
95	83,64	84,12	0,57
100	75,52	75,92	0,53
105	68,53	68,86	0,49
110	62,46	62,74	0,45
115	57,16	57,41	0,42
120	52,51	52,72	0,39
125	48,41	48,59	0,37
130	44,77	44,92	0,34
135	41,52	41,66	0,32
140	38,62	38,73	0,30

 Banzo – quadrado

Esbelteza (<i>b/t</i>)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)
20	644,40	676,16	4,93
25	415,36	432,74	4,19
30	289,81	300,52	3,70
35	213,57	220,79	3,38
40	163,89	169,04	3,14
45	129,72	133,56	2,96
50	105,22	108,19	2,82
55	87,05	89,41	2,71
60	73,22	75,13	2,61
65	62,43	64,02	2,54
70	53,87	55,20	2,47
75	46,95	48,08	2,41
80	41,28	42,26	2,36
85	36,59	37,43	2,32
90	32,65	33,39	2,28
95	29,31	29,97	2,25
100	26,46	27,05	2,22

 Banzo Retangular com comprimento = 2 * largura

Esbelteza (<i>b/t</i>)	Tensão Crítica Ansys (MPa)	Tensão Crítica Analítica (MPa)	Erro (%)
20	306,68	322,66	5,21
25	197,64	206,50	4,48
30	137,89	143,40	4,00
35	101,62	105,36	3,68
40	77,99	80,66	3,43
45	61,74	63,74	3,24
50	50,08	51,63	3,09
55	41,44	42,67	2,97
60	34,85	35,85	2,86
65	29,72	30,55	2,78
70	25,65	26,34	2,71
75	22,35	22,94	2,64
80	19,66	20,17	2,59
85	17,42	17,86	2,54
90	15,55	15,93	2,50
95	13,96	14,30	2,46
100	12,60	12,91	2,42

A2. Resultados de tensão crítica de encurvadura obtidas numericamente

Alma sólida – quadrada

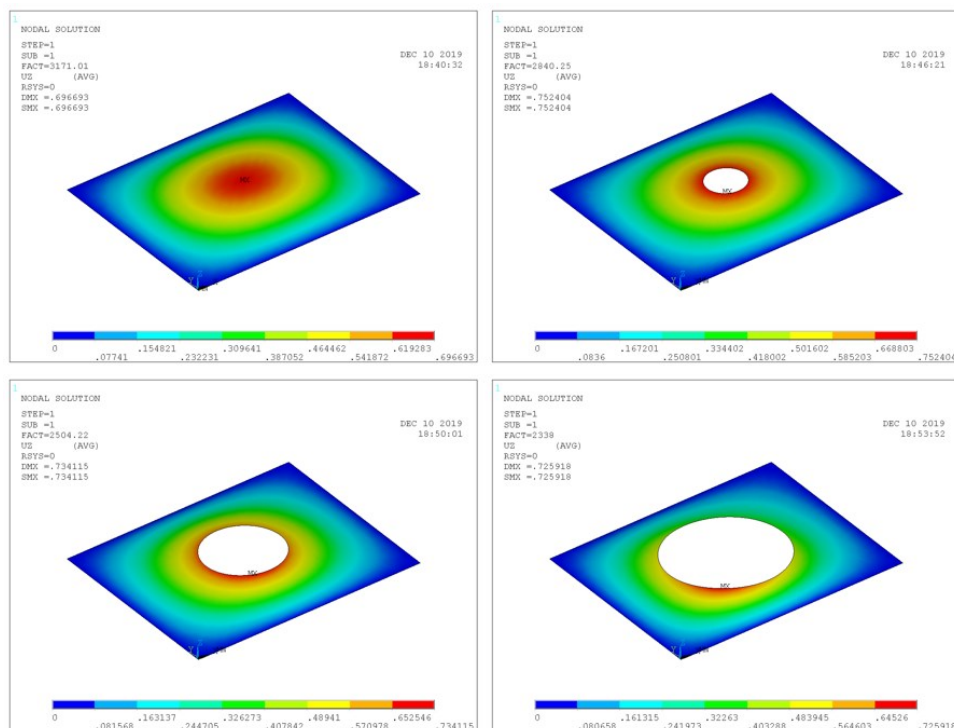
Tensão Crítica Ansys (MPa)	$d0.1H$	$d0.2H$	$d0.3H$	$d0.4H$	$d0.5H$	$d0.6H$	$d0.7H$	$d0.8H$
Esbelteza (b/t)								
20	1753,40	1601,36	1471,66	1382,70	1307,70	1214,77	1070,37	869,25
21	1592,53	1458,01	1340,08	1255,55	1191,83	1107,86	970,20	794,42
22	1455,29	1329,74	1222,08	1148,21	1090,73	1010,07	890,10	730,21
23	1332,36	1219,90	1121,36	1054,01	998,54	928,77	819,45	673,40
24	1227,05	1123,45	1030,91	968,71	920,33	856,47	756,15	617,53
25	1131,47	1035,99	952,37	895,22	851,00	792,57	697,07	572,90
26	1048,19	959,77	882,44	829,76	787,13	732,96	647,55	532,89
27	972,71	890,67	818,86	769,82	731,91	681,82	602,66	496,26
28	906,00	829,61	762,83	717,35	682,33	636,03	562,64	463,81
29	845,89	774,60	712,34	669,00	636,29	593,08	524,61	432,41
30	790,84	724,20	665,97	626,34	595,88	555,59	491,64	405,41
31	741,62	679,15	624,62	587,59	559,21	521,67	461,91	381,24
32	696,19	637,58	586,39	551,60	525,82	490,75	434,80	359,15
33	655,49	600,31	552,15	519,48	494,48	461,41	408,71	338,63
34	617,65	565,68	520,78	490,06	466,61	435,59	386,04	319,01
35	583,45	534,37	491,56	462,56	441,03	411,87	365,20	301,99
36	551,67	505,64	465,16	437,78	416,90	389,96	345,86	286,08
37	522,72	478,78	440,46	414,91	395,23	369,18	328,14	271,58
38	495,99	454,31	417,98	393,43	375,20	350,59	311,09	258,15
39	471,00	431,43	397,20	373,91	356,23	333,31	295,82	244,93
40	448,08	410,44	377,65	355,80	339,05	316,87	281,74	233,39
41	426,55	390,95	359,75	338,70	323,07	302,03	268,63	222,64
42	406,78	372,64	343,09	323,05	307,89	288,17	255,92	212,49
43	388,14	355,74	327,37	308,46	294,04	275,27	244,55	203,13
44	370,92	339,80	312,87	294,63	281,10	262,91	233,91	194,01
45	354,69	325,08	299,17	281,90	268,98	251,61	223,90	185,73
46	339,62	311,27	286,48	269,97	257,43	241,06	214,27	178,05
47	325,36	298,20	274,59	258,63	246,80	230,92	205,52	170,84
48	312,12	286,07	263,30	248,13	236,81	221,60	197,25	163,74
49	299,65	274,54	252,80	238,26	227,25	212,85	189,50	157,37
50	287,81	263,79	242,92	228,84	218,41	204,61	182,00	151,36
51	276,77	253,58	233,51	220,09	210,07	196,65	175,10	145,62
52	266,25	244,03	224,72	211,82	202,08	189,32	168,60	140,26
53	256,41	235,01	216,35	203,92	194,65	182,38	162,44	134,98
54	247,02	226,41	208,50	196,53	187,62	175,82	156,48	130,19
55	238,21	218,33	201,07	189,55	180,87	169,49	150,98	125,65

56	229,80	210,63	193,97	182,85	174,56	163,60	145,75	121,30
57	221,88	203,37	187,30	176,57	168,59	158,02	140,80	117,21
58	214,37	196,49	180,96	170,54	162,83	152,62	135,99	113,22
59	207,18	189,90	174,90	164,88	157,44	147,58	131,51	109,49
60	200,40	183,68	169,17	159,50	152,31	142,79	127,26	105,97
61	193,89	177,72	163,68	154,32	147,43	138,23	123,21	102,63
62	187,75	172,09	158,50	149,44	142,71	133,80	119,26	99,40
63	181,84	166,68	153,56	144,79	138,28	129,66	115,59	96,29
64	176,25	161,56	148,80	140,30	134,05	125,71	112,08	93,38
65	170,88	156,67	144,30	136,07	129,96	121,93	108,71	90,58
66	165,79	151,96	139,97	132,02	126,10	118,26	105,45	87,93
67	160,91	147,50	135,86	128,11	122,41	114,81	102,39	85,39
68	156,22	143,20	131,93	124,41	118,84	111,51	99,45	82,88
69	151,76	139,11	128,14	120,87	115,46	108,30	96,64	80,56
70	147,46	135,20	124,54	117,44	112,23	105,28	93,95	78,33
71	143,37	131,42	121,08	114,19	109,09	102,37	91,32	76,17
72	139,42	127,83	117,75	111,07	106,12	99,59	88,84	74,08
73	135,66	124,35	114,57	108,05	103,26	96,88	86,47	72,11
74	132,02	121,04	111,50	105,18	100,49	94,31	84,18	70,20
75	128,55	117,86	108,57	102,42	97,86	91,85	81,96	68,39
76	125,21	114,78	105,75	99,74	95,33	89,45	79,85	66,64
77	121,99	111,84	103,03	97,19	92,90	87,17	77,82	64,91
78	118,90	109,00	100,43	94,74	90,53	84,98	75,87	63,30
79	115,91	106,27	97,92	92,36	88,28	82,87	73,96	61,74
80	113,05	103,64	95,49	90,08	86,11	80,81	72,15	60,22
81	110,28	101,11	93,16	87,89	84,00	78,85	70,41	58,78
82	107,63	98,68	90,91	85,76	81,98	76,97	68,73	57,36
83	105,05	96,32	88,75	83,73	80,04	75,15	67,08	56,00
84	102,58	94,05	86,66	81,76	78,14	73,37	65,52	54,70
85	100,20	91,85	84,64	79,85	76,33	71,67	64,01	53,45
86	97,88	89,74	82,69	78,02	74,59	70,03	62,55	52,23
87	95,66	87,70	80,82	76,24	72,88	68,43	61,12	51,04
88	93,50	85,73	78,99	74,53	71,25	66,91	59,76	49,91
89	91,42	83,82	77,24	72,88	69,67	65,43	58,44	48,81
90	89,41	81,97	75,53	71,27	68,15	64,00	57,17	47,75
91	87,46	80,19	73,89	69,72	66,66	62,60	55,92	46,71
92	85,57	78,47	72,31	68,23	65,23	61,26	54,72	45,71
93	83,75	76,79	70,76	66,77	63,85	59,97	53,57	44,75
94	81,98	75,17	69,27	65,36	62,50	58,70	52,45	43,82
95	80,28	73,60	67,83	64,01	61,20	57,48	51,35	42,91
96	78,62	72,09	66,43	62,68	59,94	56,30	50,30	42,03
97	77,01	70,61	65,07	61,40	58,71	55,16	49,28	41,18
98	75,46	69,18	63,75	60,17	57,53	54,04	48,29	40,35
99	73,94	67,80	62,48	58,96	56,39	52,96	47,32	39,55
100	72,48	66,45	61,24	57,79	55,26	51,92	46,40	38,78
101	71,05	65,15	60,04	56,66	54,18	50,91	45,49	38,02

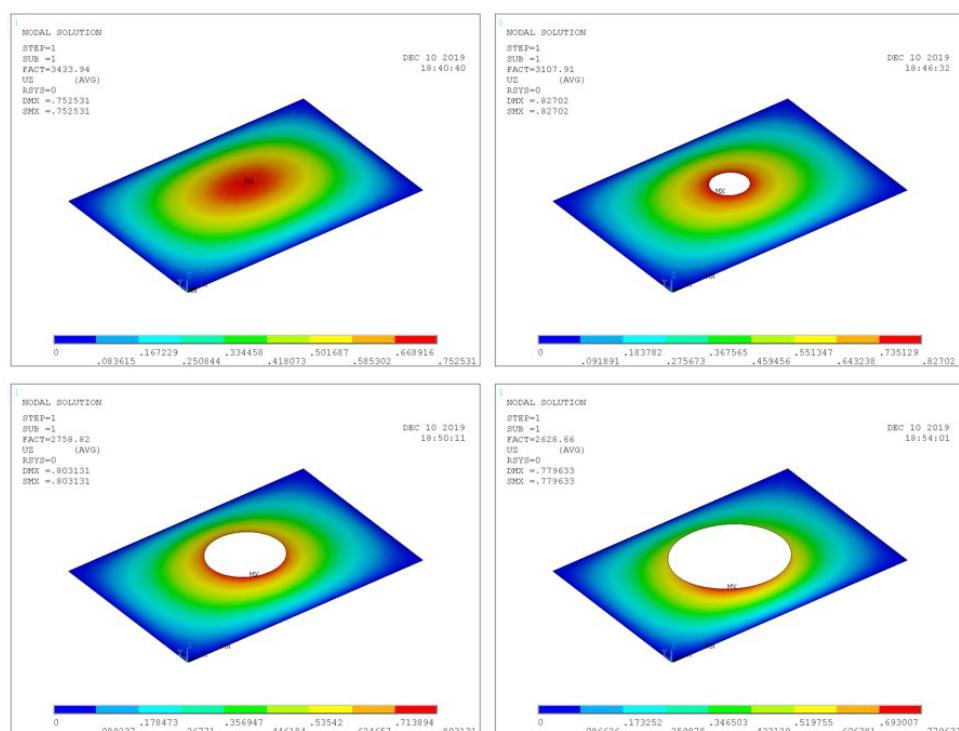
102	69,67	63,88	58,87	55,56	53,14	49,91	44,61	37,29
103	68,33	62,65	57,74	54,49	52,11	48,96	43,75	36,57
104	67,02	61,46	56,64	53,45	51,12	48,03	42,92	35,88
105	65,76	60,29	55,57	52,44	50,16	47,12	42,12	35,21
106	64,53	59,17	54,53	51,46	49,22	46,24	41,34	34,55
107	63,33	58,07	53,52	50,51	48,31	45,39	40,58	33,92
108	62,17	57,00	52,54	49,58	47,42	44,56	39,83	33,30
109	61,04	55,97	51,58	48,68	46,56	43,75	39,11	32,70
110	59,93	54,95	50,65	47,81	45,72	42,96	38,41	32,12
111	58,86	53,97	49,74	46,95	44,91	42,20	37,73	31,54
112	57,82	53,02	48,86	46,12	44,11	41,45	37,06	30,99
113	56,80	52,09	48,01	45,31	43,34	40,73	36,41	30,45
114	55,81	51,18	47,17	44,52	42,59	40,02	35,78	29,93
115	54,85	50,29	46,35	43,75	41,85	39,33	35,17	29,41
116	53,91	49,44	45,56	43,00	41,14	38,66	34,57	28,91
117	53,00	48,59	44,79	42,28	40,44	38,01	33,98	28,42
118	52,10	47,78	44,04	41,57	39,76	37,37	33,41	27,95
119	51,23	46,98	43,30	40,87	39,10	36,75	32,86	27,49
120	50,39	46,20	42,58	40,20	38,45	36,14	32,32	27,03
121	49,56	45,45	41,89	39,54	37,82	35,55	31,79	26,59
122	48,75	44,70	41,20	38,89	37,21	34,98	31,28	26,16
123	47,97	43,98	40,54	38,27	36,61	34,41	30,77	25,74
124	47,20	43,28	39,89	37,65	36,02	33,86	30,28	25,33

A3. Encurvadura elástica de placas

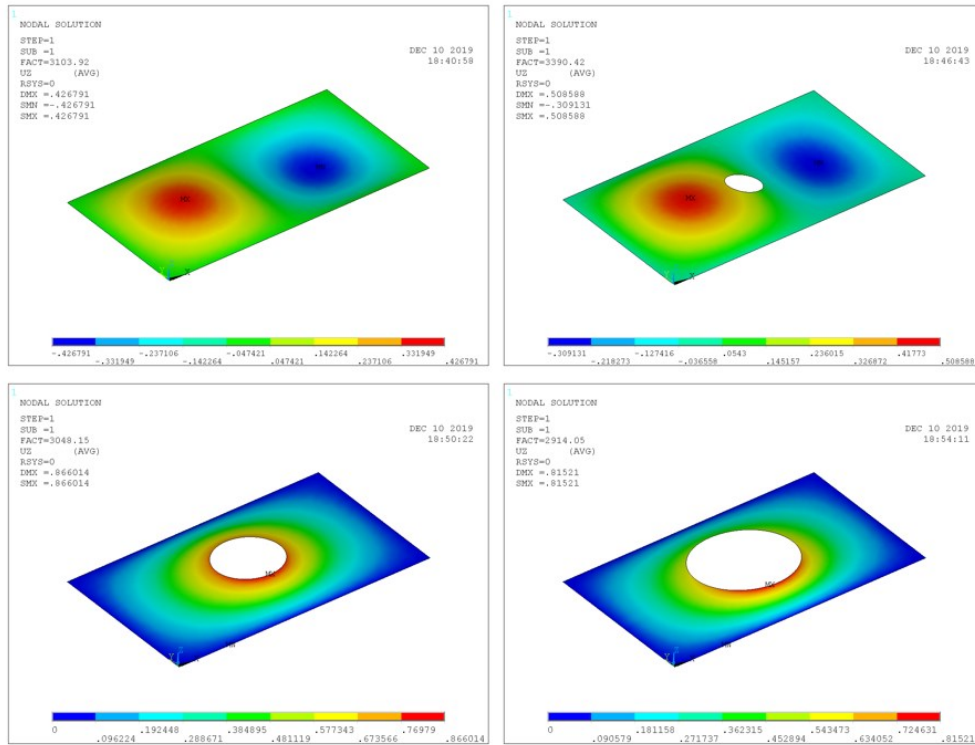
Modo de enrvadura elástica para placas com $L = 1.2H_w$ e $0 \leq d_0/H_w \leq 0,6$



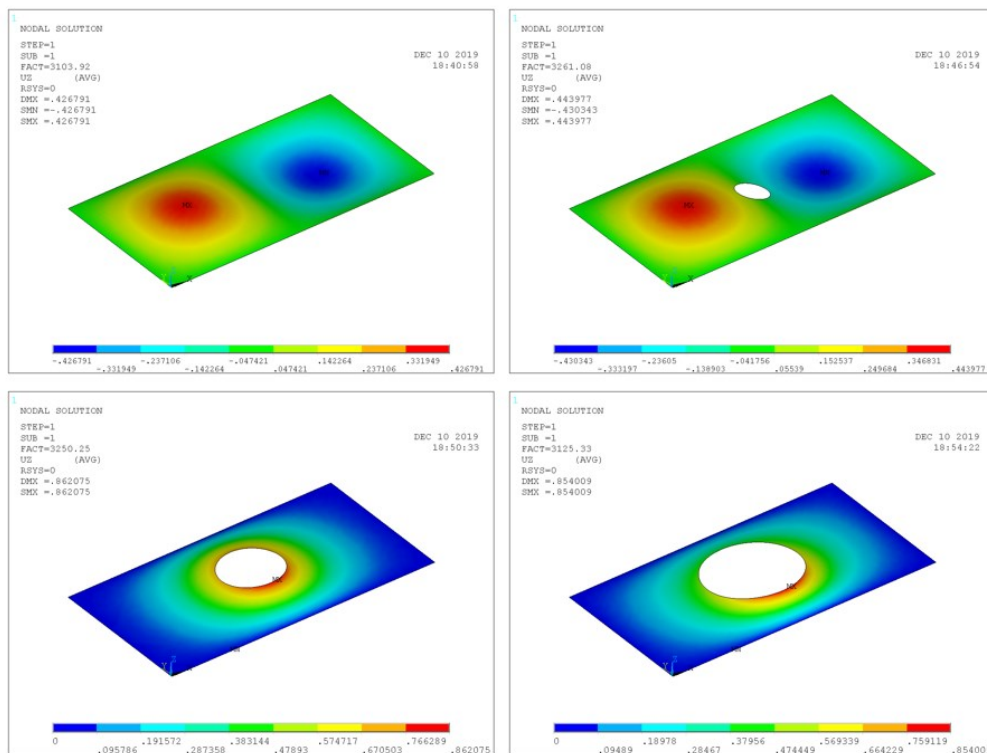
Modo de enrvadura elástica para placas com $L = 1.4H_w$ e $0 \leq d_0/H_w \leq 0,6$



Modo de enrvadura elástica para placas com $L = 1.6H_w$ e $0 \leq d_0/H_w \leq 0,6$



Modo de enrvadura elástica para placas com $L = 1.8H_w$ e $0 \leq d_0/H_w \leq 0,6$

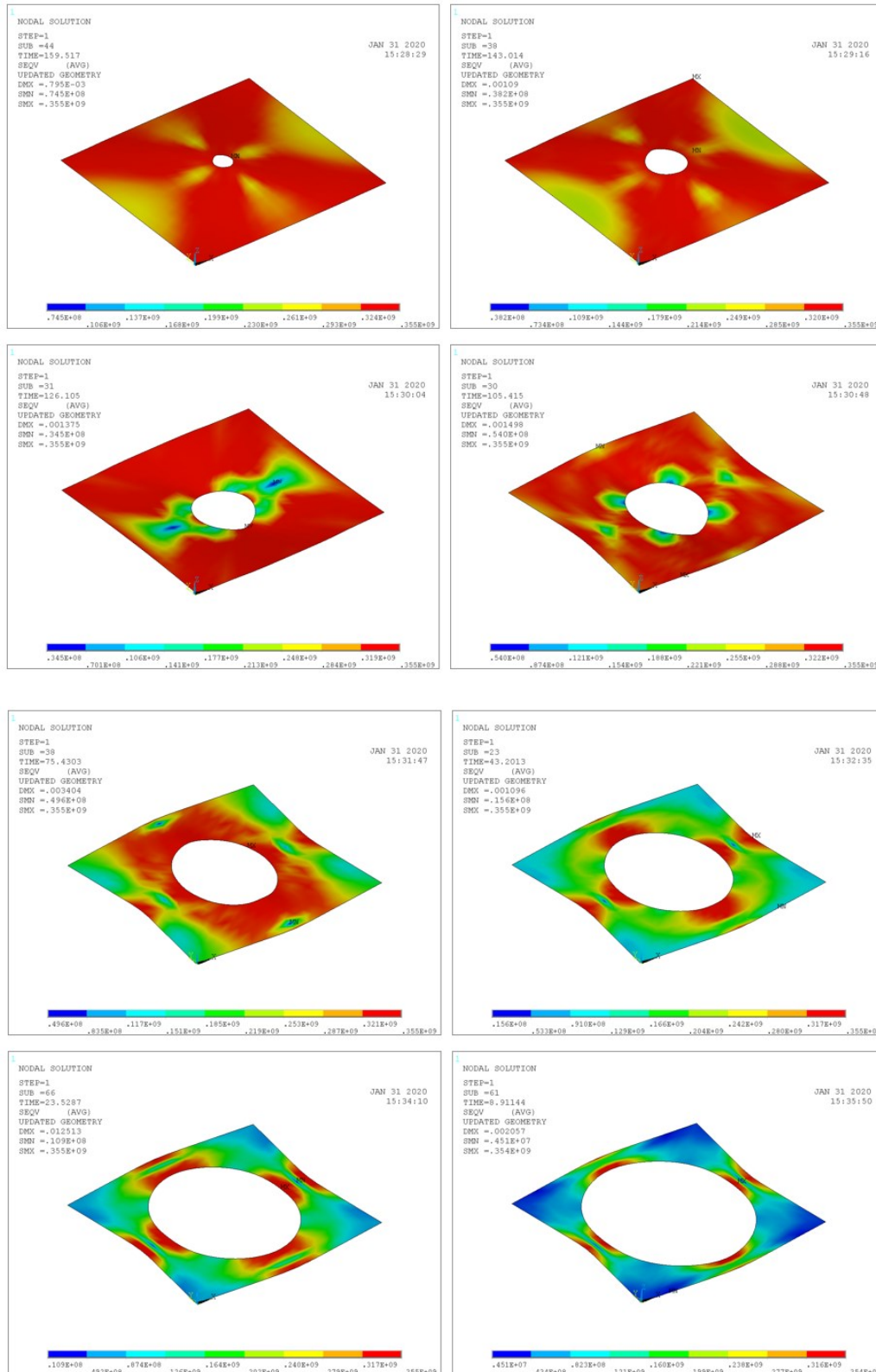


A4. Tensão crítica obtida numericamente para esbelteza geométrica $H_w/t = 50$

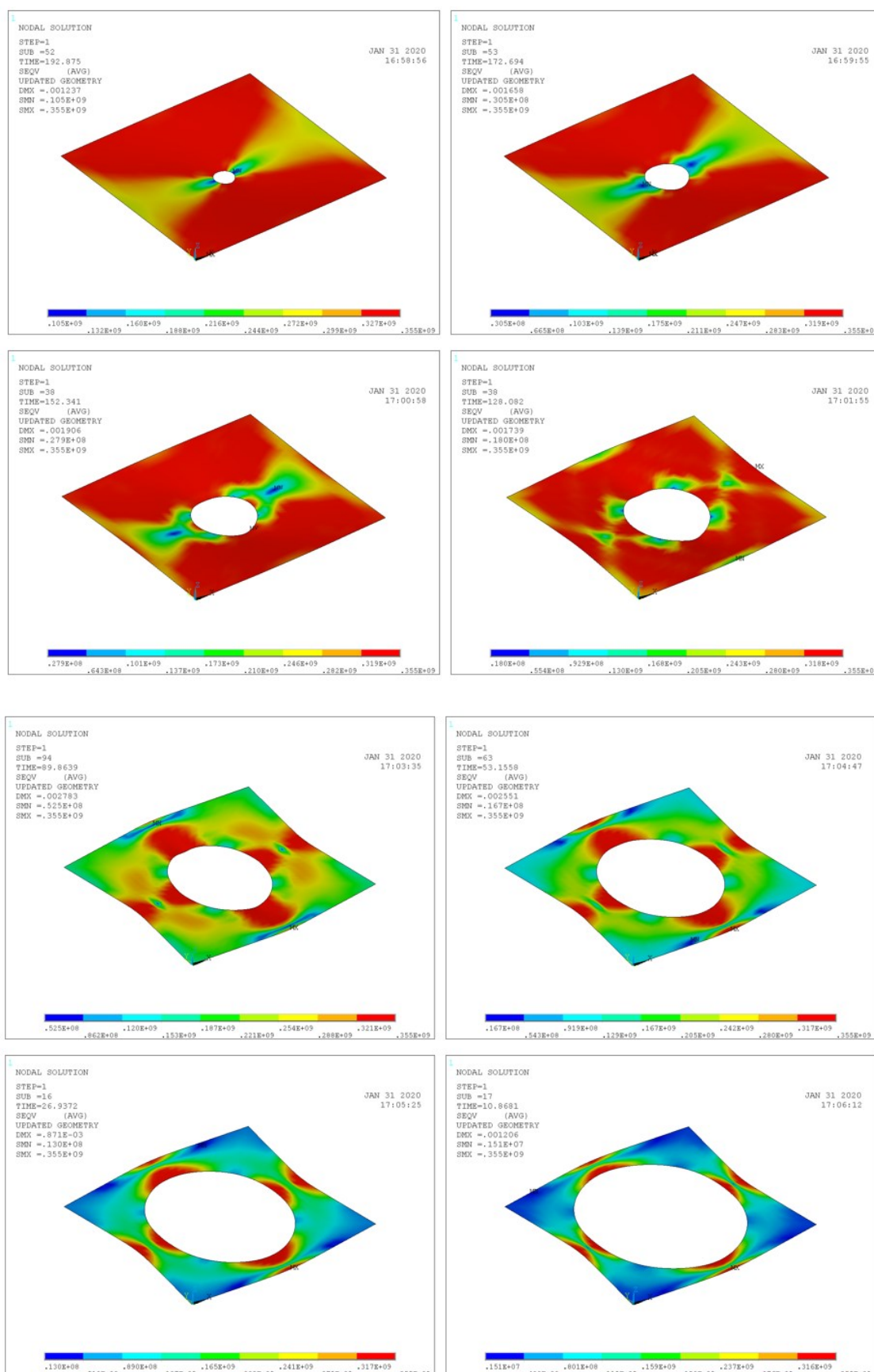
L/H_w	Tensão Crítica d00H	Tensão Crítica d01H	Tensão Crítica d02H	Tensão Crítica d03H	Tensão Crítica d04H	Tensão Crítica d05H	Tensão Crítica d06H	Tensão Crítica d07H	Tensão Crítica d08H
1	298,24	287,81	263,79	242,92	228,84	218,41	204,61	182,00	151,36
1,05	301,13	289,28	266,10	245,70	232,09	222,48	210,22	189,11	158,13
1,1	303,26	291,93	269,37	249,30	235,95	227,00	216,21	196,89	166,56
1,15	306,55	295,62	273,52	253,63	240,44	232,00	222,56	205,29	176,39
1,2	310,88	300,27	278,46	258,62	245,51	237,45	229,22	214,13	187,27
1,25	316,12	305,76	284,10	264,22	251,10	243,32	236,11	223,21	198,90
1,3	322,21	312,04	290,39	270,34	257,15	249,56	243,19	232,39	211,01
1,35	329,08	319,14	297,34	277,01	263,69	256,20	250,46	241,55	223,37
1,4	336,66	326,78	304,70	283,97	270,47	263,02	257,71	250,43	235,62
1,45	333,06	334,99	312,48	291,22	277,51	270,02	264,96	258,96	247,48
1,5	326,47	331,21	320,56	298,65	284,68	277,12	272,11	267,02	258,64
1,55	320,85	325,45	328,74	306,08	291,86	284,20	279,06	274,52	268,80
1,6	316,11	320,59	332,39	313,26	298,84	291,09	285,69	281,40	277,82
1,65	312,16	316,51	328,33	319,81	305,36	297,59	291,87	287,62	285,66
1,7	308,93	313,22	324,90	325,24	311,10	303,50	297,48	293,15	292,39
1,75	306,33	310,50	322,02	328,91	315,64	308,52	302,35	297,97	298,16
1,8	304,31	308,37	319,71	330,35	318,65	312,44	306,40	302,08	303,09
1,85	302,82	306,78	317,94	329,58	319,96	315,09	309,56	305,49	307,28
1,9	301,81	305,68	316,65	327,23	319,67	316,41	311,81	308,21	310,78
1,95	301,24	305,02	315,81	323,91	318,10	316,52	313,16	310,26	313,65
2	301,08	304,81	315,42	320,12	315,67	315,61	313,70	311,69	315,91

A5. Tensão equivalente de Von-Mises obtidas por simulações não lineares com imperfeições geométricas.

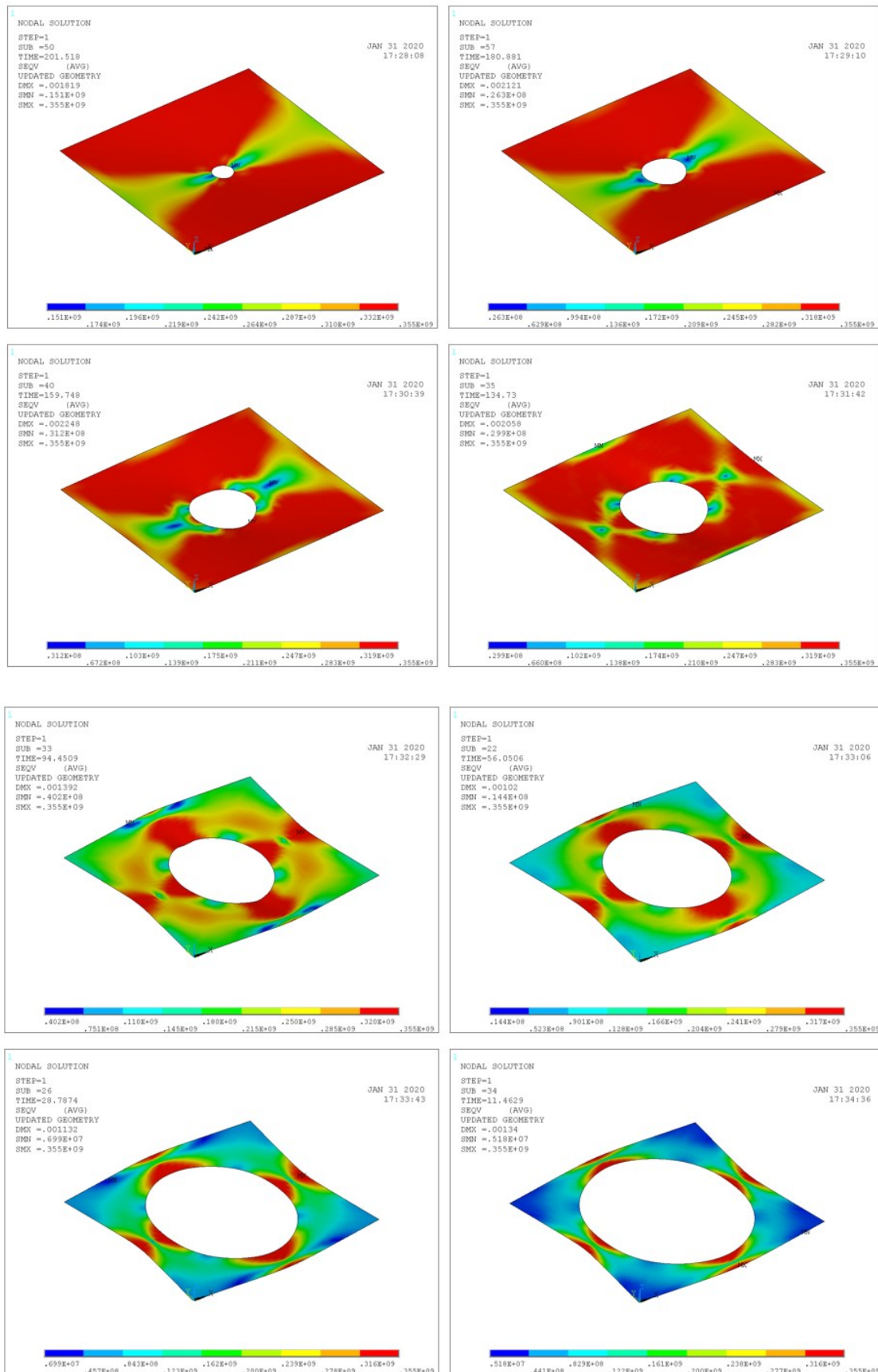
Distribuição de tensões para a viga IPE160 com $0,1 \leq d_0/H_w \leq 0,8$



Distribuição de tensões para a viga IPE240 com $0,1 \leq d_0/H_w \leq 0,8$



Distribuição de tensões para a viga IPE270 com $0,1 \leq d_0/H_w \leq 0,8$



Distribuição de tensões para a viga IPE300 com $0,1 \leq d_0/H_w \leq 0,8$ 