

ESTUDO NUMÉRICO DA FLAMBAGEM LOCAL NA MESA EM PERFIS DE ALMA SENOIDAL SUBMETIDOS À COMPRESSÃO AXIAL

Numerical Study of the Flange Local Buckling in Sinusoidal Web Profiles under Compressive Strength

Melina Guimarães Alves¹, Francisco Carlos Rodrigues², Ricardo Hallal Fakury³,
Ana Lydia dos R. Castro e Silva⁴

Recebido em 16 de fevereiro de 2017; aceito em 18 de julho de 2017; disponível on-line em 09 de março de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Método dos Elementos Finitos;
Perfis de alma senoidal;
Flambagem local nas mesas;
Compressão axial;

KEYWORDS:

Finite Element Method;
Sinusoidal web steel profiles;
Flange local buckling;
Compressive strength;

RESUMO: Este trabalho avaliou o desempenho relativo de perfis de alma senoidal quando comparados aos perfis de alma plana através do estudo numérico da flambagem local em mesas (FLM) de barras submetidas à compressão axial. Para a realização deste estudo foram discretizados dois modelos via Método dos Elementos Finitos (MEF) com o emprego do programa ABAQUS®. A metodologia numérica baseou-se em realizar análise de carga crítica de flambagem local, mantendo-se fixo os valores de largura de mesas, espessura e altura de alma para cada perfil e alterar gradativamente a espessura das mesas, sendo possível atingir vários resultados de tensão crítica para cada esbeltez, definindo-se a curva tensão versus esbeltez da fase elástica. A partir dos resultados numéricos obtidos foi possível realizar a parametrização analítica com as prescrições da norma ABNT NBR 8800:2008 e fazer uma proposição de metodologia de cálculo para os parâmetros de esbeltez das mesas. Posteriormente, realizaram-se comparativos entre o desempenho dos perfis de alma senoidal e o dos perfis de alma plana. Os resultados numéricos mostraram que o desempenho de um perfil de alma senoidal pode ser até 8% mais eficiente que o dos perfis de alma plana, no que tange a possibilidade de colapso do perfil sem a ocorrência de FLM quando submetidos à compressão axial.

ABSTRACT: This work evaluated the relative performance of sinusoidal web profiles through the numerical study of flange local buckling (FLB) for simple bars under compressive strength, when compared to flat web profiles. For this study, two models were discretized using the Finite Element Method (FEM) through the ABAQUS® program. The numerical methodology was based on Buckle analysis, maintaining the values of table width, web thickness and web height for each profile and gradually changing the thickness of the flanges, this way was possible to reach several results of critical tension for each slenderness, being defined the curve of the elastic phase. From the numerical results obtained it was possible to perform the analytical parameterization with the norm ABNT NBR8800:2008 and to make a proposition of calculation for the parameters of slenderness that limit each buckling modes of the flanges. Considering these results, comparisons were made between the performance of the sinusoidal web profiles and those from the flat web profiles. The numerical results showed that the performance of a sinusoidal web profile can be up to 8% more efficient than flat soul profiles, regarding the possibility of collapse of the structure without the occurrence of FLB when subjected under compressive strength.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: melina.guimaraes86@gmail.com (M. G. Alves)

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

² e-mail: francisco@dees.ufmg.br (F. C. Rodrigues)

Doutor, Professor efetivo, Departamento de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

³ e-mail: fakury@dees.ufmg.br (R. H. Fakury)

Doutor, Professor efetivo, Departamento de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

⁴ e-mail: analydiarcs@gmail.com (A.L.R. Castro e Silva)

Doutora, Professora efetiva, Departamento de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

1. INTRODUÇÃO

A cada ano no Brasil as estruturas de aço vêm ganhando mais espaço na construção civil, sendo muitas vezes solução para obras de grande porte. Para vigas que necessitam vencer grandes vãos e pilares sujeitos a severas condições de instabilidade é comum a utilização de perfis I soldados, nos quais as duas mesas e a alma são constituídas por chapas grossas, com as dimensões da seção transversal determinadas, de acordo com as necessidades estruturais. Perfis soldados são utilizados, em sua maioria, quando as solicitações de cálculo superam a capacidade resistente dos perfis laminados, mas o seu uso pode se tornar relativamente mais caro devido ao seu processo de fabricação. Do mesmo modo, o uso de enrijecedores transversais para aumentar a resistência do perfil pode aumentar o peso próprio da estrutura além de onerar a obra, também em consequência de seu processo de fabricação. Conforme SOUZA (2006, p. 3) outro agravante na possível utilização de enrijecedores é a potencialização da fadiga, um fenômeno indesejável em estruturas de modo geral.

Em 1966, para reduzir o peso dos perfis soldados e o custo da estrutura de aço, um novo perfil com seção I, composto por mesas de chapas planas grossas e uma alma de chapa fina com corrugação senoidal (Figura 1), conhecido como perfil de alma senoidal (PAS), começou a ser produzido pela empresa Sueca *Ranabalken*.

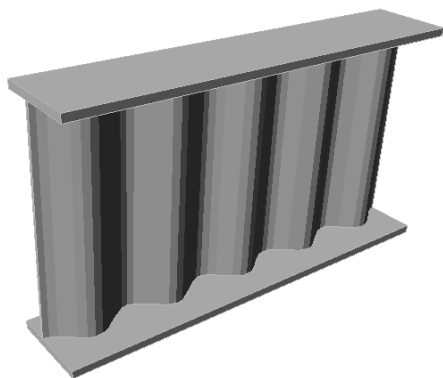


FIGURA 1: Perfil I com alma de chapa corrugada senoidal.

FONTE: PINTO (2008).

Posteriormente, os perfis de alma

senoidal foram aplicados na construção de diversas outras estruturas principalmente galpões comerciais (Figura 1), edifícios industriais e comerciais, pontes e travessias de pedestres, devido ao excelente comportamento mecânico e à elevada eficiência estrutural e executiva destes perfis, PLAIS 2005.

Quando submetidos à flexão, os perfis de alma senoidal apresentam grande capacidade resistente à flambagem local da alma por força cortante. Além disto, nesses perfis, a relação entre peso próprio e capacidade resistente permite a construção de maiores vãos livres, suprimindo apoios e bases de fundação, reduzindo custos e acelerando a montagem. A resposta estrutural desse perfil permite a comparação do comportamento do mesmo ao de uma treliça, onde os momentos fletores e forças normais são transmitidos apenas pelas mesas do perfil. Essa analogia é levada em consideração pelas empresas fabricantes em algumas verificações dos perfis de alma corrugada, onde, geralmente, são adotados processos de cálculo bastante simplificados (SOUZA, 2006). Neste caso, o emprego de perfis de alma corrugada é interessante na faixa de utilização econômica das treliças, pois permite uma redução de custo de fabricação de até 20% em relação a estas (RESENDE, 2006). A Figura 2 mostra estrutura de galpão comercial em alma corrugada.

O estado-limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM) em perfis I de alma plana se baseia na esbelteza da mesa - dada pela relação largura/espessura, b/t , onde b é a metade da largura da mesa, além de condições de contorno das placas que formam a seção transversal. Há dez anos, um grupo de pesquisadores da UFMG, em parceria com a CODEME ENGENHARIA S.A., produtora desses perfis, realizou inúmeras pesquisas, avançando no desenvolvimento de protótipos consistentes de cálculo, dimensionamento e projeto de estruturas com esse componente estrutural. Em 2012 a empresa ZEMAN & CO (Gartner, 2012) publicou uma nova metodologia de cálculo para esses perfis, o que deixou em defasagem as pesquisas realizadas anteriormente.



FIGURA 2: Galpão Comercial em alma corrugada, Viena.
FONTE: ZEMAN & CO (2012).

Uma desvantagem do uso desse perfil é a inexistência de norma própria, induzindo os estudos à utilização de um paralelo com a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), que trata do dimensionamento dos perfis I laminados ou soldados com almas de chapa plana, ou perfis de seção tubular com ou sem costura.

O estado-limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM) em perfis I de alma plana se baseia na esbelteza da mesa – dada pela relação largura/espessura, b/t , onde b é a metade da largura da mesa, além de condições de contorno das placas que formam a seção transversal.

Este trabalho estudou, por meio de análise numérica e analítica, a flambagem local da mesa em perfis de alma senoidal submetidos à compressão axial, tendo como base os resultados obtidos por diversos pesquisadores e, ainda, a nova publicação da empresa ZEMAN & CO.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento de barras comprimidas, propondo uma metodologia de cálculo para os perfis de alma senoidal associada ao estado-limite último de flambagem local da mesa no intuito de

se comparar seu desempenho ao dos perfis de alma plana.

De acordo com Resende (2006), uma das desvantagens do perfil de alma senoidal é o desenvolvimento tardio de programas para o dimensionamento estrutural, a não existência de norma brasileira para projeto, uso reduzido em função do desconhecimento da maioria dos projetistas e a falta de estudo relacionado ao projeto e à execução de ligações.

Este trabalho intenciona suprimir parte da carência de informações acerca da FLM em perfis de alma senoidal (PAS) submetidos à compressão por meio de uma análise numérica da fase elástica via ABAQUS® e, em seguida, um estudo parametrizado com base no procedimento analítico utilizado para vigas de alma plana, segundo a norma NBR 8800 (ABNT, 2008). Posteriormente, este estudo procura comparar os resultados obtidos para perfis de alma senoidal aos de perfis de alma plana.

Tendo em mãos esses resultados, intenciona-se esboçar curvas de tensão de início da flambagem com acréscimo de 8% de resistência pós flambagem na fase elástica, conforme sugerido por Souza (2006), com objetivo de se ilustrar o desempenho destes perfis em relação aos perfis de alma plana. Diante disso, é de

interesse deste estudo traçar os gráficos de tensão no estado-limite último da FLM expressando os parâmetros de esbeltez em função da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço do perfil.

3. METODOLOGIA

Para se atingir os objetivos apresentados no item 2 foram elaborados e analisados, no programa ABAQUS® 6.14, duas séries de modelagens de perfis de alma senoidal, todos sujeitos a força normal de compressão em estudo de carga crítica de flambagem local. Para a discretização dos modelos, utilizaram-se elementos de casca de quatro nós, com seis graus de liberdade por nó (três translações X, Y, Z e três rotações em torno de X, Y, Z). Uma vez gerado e calibrado o modelo, realizou-se um estudo paramétrico analítico para obtenção de seu estado-limite último para cada um dos diversos valores de esbeltez de mesa.

Um dos perfis de alma senoidal modelado numericamente neste estudo foi reproduzido a partir de um dos modelos fornecidos pela empresa CODEME ENGENHARIA SA, com os quais, anteriormente, foram realizadas análises experimentais no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), do Departamento de Engenharia de Estruturas da EE.UFMG. Estes ensaios foram realizados por PINTO (2008), no âmbito de seu Projeto de Tese, cujos resultados experimentais obtidos bem como os resultados da análise numérica parcial realizada com o programa ANSYS® serviram como bases para os estudos durante o desenvolvimento da presente pesquisa. Sendo assim, para a implementação do modelo numérico, os parâmetros denominados de b_f para largura da mesa, t_f espessura da mesa, t_w espessura da alma e b_w amplitude da senóide, foram obtidos do modelo fornecido pela CODEME. Além disso, esse modelo também era provido de duas chapas de topo, posicionadas nas extremidades transversalmente às mesas do perfil, onde, nos ensaios, era aplicado o

carregamento parcialmente distribuído de compressão. O segundo PAS foi gerado a partir da mesma referência da primeira (PINTO, 2008), porém com alterações propostas por estudos numéricos anteriores, onde não se utilizavam estas chapas de topo. As chapas de topo em aço USICIVIL 350, a seção transversal e os demais detalhes dos protótipos estão ilustrados nas Figuras 3 e 4 e suas medidas e propriedades comerciais conforme a Tabela 1.

Para a modelagem dos perfis de alma senoidal, desconsiderou-se os limites geométricos de espessura de mesa na faixa comercial, como os apresentados na Tabela 1, pois foi necessário encontrar valores teóricos, os quais se dariam para espessuras que poderiam não estar dentro desta faixa. A Tabela 2 mostra as dimensões dos modelos estudados.

Para se aferir os resultados de cada modelo, realizou-se uma calibração tendo como base os resultados obtidos por Souza (2006). Após a calibração, os dois modelos passaram pela análise numérica de carga crítica de flambagem local nas mesas.

Os resultados obtidos na modelagem numérica foram analisados e comparados com os resultados calculados conforme a norma NBR 8800 (ABNT, 2008) para o perfil de alma plana. Consecutivamente, por meio de parametrização, foi possível propor uma formulação para o cálculo da tensão média correspondente à distribuição não-uniforme da tensão normal quando a mesa do perfil entra em colapso por flambagem local ($\sigma_{fl,m}$).

O dimensionamento do perfil de alma plana foi realizado conforme as prescrições da norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008), de modo que a esbeltez da mesa para perfis de alma plana soldados ou laminados pode ser calculada conforme a Equação 1:

$$\frac{b}{t_f} = \frac{b_f}{2} \quad \text{Eq.[1]}$$

Em que:

b/t_f = esbeltez da mesa (adimensional);

b_f = largura da mesa (mm);

t_f = espessura da mesa (mm).

TABELA 1: Dimensões comerciais e materiais dos perfis de alma senoidal.			
Elemento	Tipo de Aço	Altura (h) (mm)	Espessura (t_w) (mm)
Alma	USI CIVIL 300 $f_y=300\text{MPa}; f_u=410\text{MPa}$	395;495;595;795;990; 1190	2,0 e 3,0
Elemento	Tipo de Aço	Largura (b_f) (mm)	Espessura (t_{fs}, t_{fi}) (mm)
Mesa	USI CIVIL 350 $f_y=350\text{MPa}; f_u=500\text{MPa}$	$125 \leq b_f \leq 350$	$4,75 \leq t_{fs} \leq 19,0$ $4,75 \leq t_{fi} \leq 19,0$

FONTE: Adaptado de PLAIS (2005).

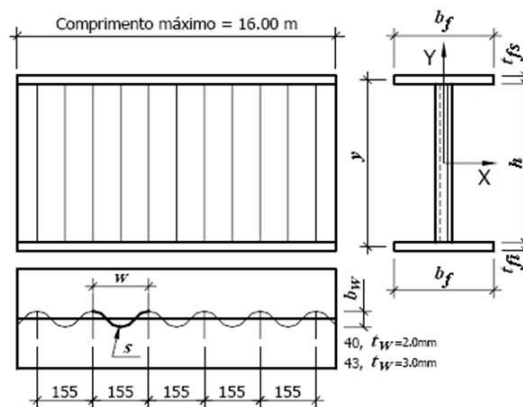


FIGURA 3: Parâmetros geométricos dos perfis de alma senoidal

FONTE: PLAIS (2005).

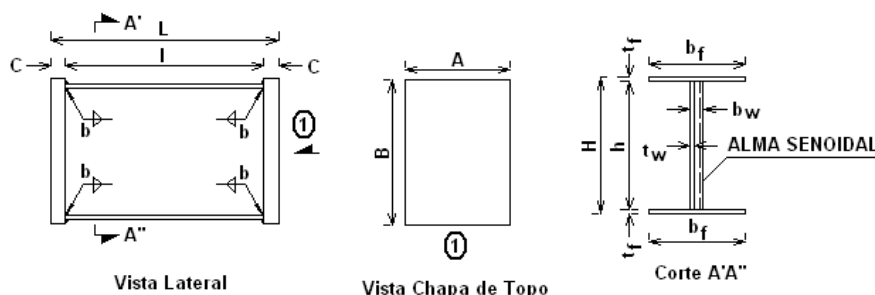


FIGURA 4: Seção transversal e detalhes dos modelos

FONTE: PINTO (2008).

Modelo	Dimensões (mm)						
	b_f	t_f	l	L	A	B	C
2S	204	2-6,28	1082	1146	232	756	32,3
3S	204	2-19	1082	1146	x	x	x

FONTE: Autoria própria.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta uma formulação para verificação da mesa de perfis H, I ou T soldados sujeitos à força normal de compressão. Ao se analisar elementos AL (elementos com uma borda vinculada e outra

livre) de um perfil I soldado através dessa formulação, os valores limites que separam a plastificação do perfil, o colapso por flambagem inelástica e o colapso por flambagem elástica são dados por $(b/t)_{lim}$ e $(b/t)_{sup}$ que são obtidos, respectivamente, através das Equações 2 e 3.

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,64 \cdot \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad \text{Eq.[2]}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{sup} = 1,17 \cdot \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \quad \text{Eq.[3]}$$

A tensão média de flambagem local ($\sigma_{fl,m}$), por sua vez, é dada por meio da Equação 4:

$$\frac{0,83 \cdot k_c \cdot E}{(b/t_f)^2} \quad \text{Eq.[4]}$$

Em que:

- k_c = coeficiente de flambagem (adimensional);
- t_f = espessura da mesa (mm);
- E = módulo de elasticidade (MPa);
- f_y = resistência ao escoamento do aço (MPa).

PIMENTA (2008) fez estudo semelhante, parametrizando os procedimentos de cálculo apresentados na norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008), fazendo com que a esbeltez da mesa comprimida fosse calculada analogamente ao procedimento de perfis laminados de alma plana, conforme Equação 5:

$$\lambda = \frac{\frac{b_f}{2} - \frac{b_w}{4}}{t_f} \quad \text{Eq.[5]}$$

Em que:

- λ = esbeltez da mesa para perfis de alma senoidal (adimensional);
- b_f = largura da mesa (mm);
- b_w = amplitude da senoide (mm);
- t_f = espessura da mesa (mm);

O estudo numérico focou na análise do fenômeno de Flambagem Local da Mesa de perfis senoidais na fase elástica, através do estudo da carga crítica de flambagem elástica, via Método dos Elementos Finitos (MEF), e encontrou para cada espessura de mesa um autovalor relativo a uma determinada esbeltez, o qual foi traduzido em tensão elástica de FLM e utilizado na análise paramétrica com base na NBR 8800 (ABNT, 2008), no intuito de se propor uma metodologia de

cálculo capaz de definir os parâmetros de esbeltez para os perfis de alma senoidal. Tendo os parâmetros de esbeltez conhecidos, foi possível traçar as curvas de tensão de início de flambagem local para cada modelo estudado e, realizar o estudo da carga crítica de flambagem elástica com acréscimo de 8% de resistência pós flambagem, conforme sugerido por SOUZA (2006). A partir destas curvas foi possível comparar o desempenho entre os perfis de alma senoidal e os de alma plana.

Em todos os modelos implementados, o pré-processador utilizado no ABAQUS® gerou modelos de casca, com malhas de elementos S4, podendo variar em número conforme a necessidade; o refinamento se deu até o ponto que a redução das dimensões do elemento não causava alterações significativas nos resultados, sendo, então, consideradas adequadas ao estudo. As análises numéricas aqui realizadas se limitaram a encontrar valores de carga crítica de flambagem elástica, nos modelos submetidos à compressão axial por meio de forças externas de 1N/mm² via por carregamento linear nas bordas ou por pressão nas extremidades (apenas para o perfil provido de chapa de topo). Foi considerado $E=200.000$ MPa, conforme especificações da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), uma vez que este estudo apenas levou em consideração a compressão axial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA E ANALÍTICA DOS MODELOS

O As Figuras 5 e 6 ilustram alguns dos resultados numéricos para cada modelo.

Tendo em mãos os resultados da modelagem numérica e considerando $E = 200.000$ MPa e $f_y = 350$ MPa e a tensão residual da ordem de 40% de f_y , foi possível obter resultados característicos de cada modelo e traçar as curvas $\sigma_{fl,m}$ versus esbeltez para verificação da FLM. Observou-se que o gráfico ajustou bem no que tange limites de esbeltez superiores e suas

respectivas tensões médias, ao se considerar tensão residual de 140 MPa. Para as análises a seguir considera-se b/t_f a esbeltez da mesa para perfis de alma plana conforme Equação 1, λ a esbeltez da mesa para perfis de alma senoidal calculada conforme Equação 5, t_f a espessura da mesa e $\sigma_{fl,m}$ a tensão média na fase elástica.

O Quadro 1 mostra valores de tensão

média de flambagem elástica, calculadas conforme Equação 4, acrescidas de resistência pós flambagem para a fase elástica do perfil de alma plana. A partir desses resultados e com base nas prescrições da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), através das Equações 2 e 3, foi possível realizar o gráfico da Figura 7.

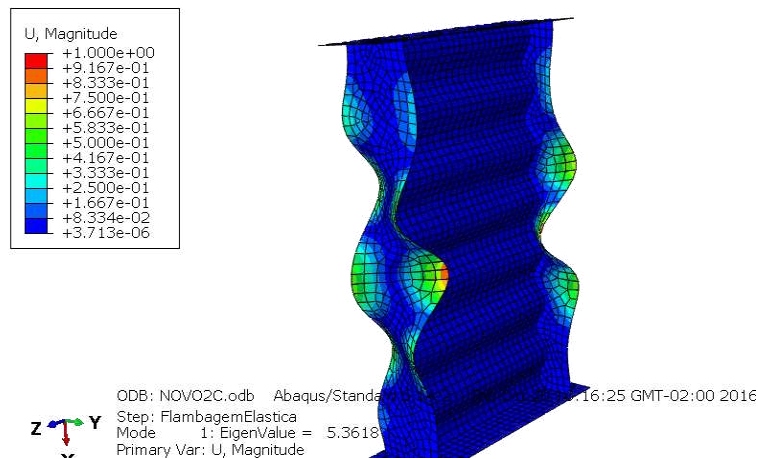


FIGURA 5: Configuração do modelo 2S, espessura de mesa igual a 5mm.

FONTE: Autoria própria.

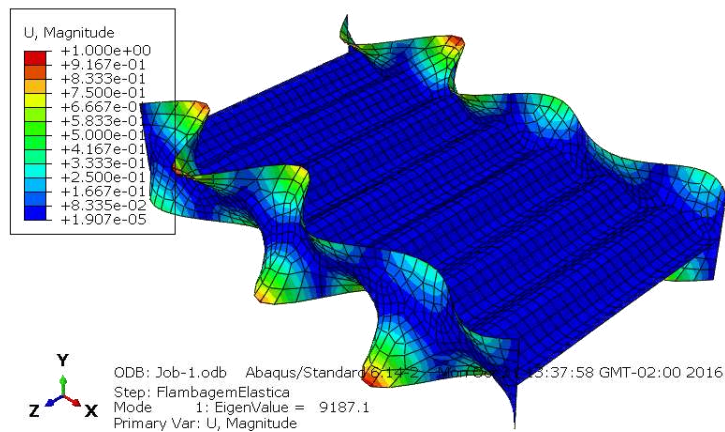


FIGURA 6: Resultados obtidos do modelo 3S com espessura de mesa de 7,5mm.

FONTE: Autoria própria.

QUADRO 1: Valores analíticos de esbeltez superior e esbeltez intermediária e respectivas tensões com acréscimo de resistência pós flambagem do perfil de alma plana.

	Esbeltez da mesa (b/t)	$\sigma_{fl,m}$ (MPa)	Acréscimo de tensão pós flambagem (MPa)	Modos de Flambagem
Modelo 1I	51,00	48,70	52,59	Flambagem Elástica
	46,36	58,92	63,64	
	40,80	76,09	82,17	
	36,43	95,44	103,08	
	34,00	109,57	118,33	
	30,91	132,57	143,18	
	29,14	149,13	161,06	
	25,50	194,78	210,37	
	24,43	212,22	229,20	$(b/t)_{sup}$

FONTE: Autoria própria.

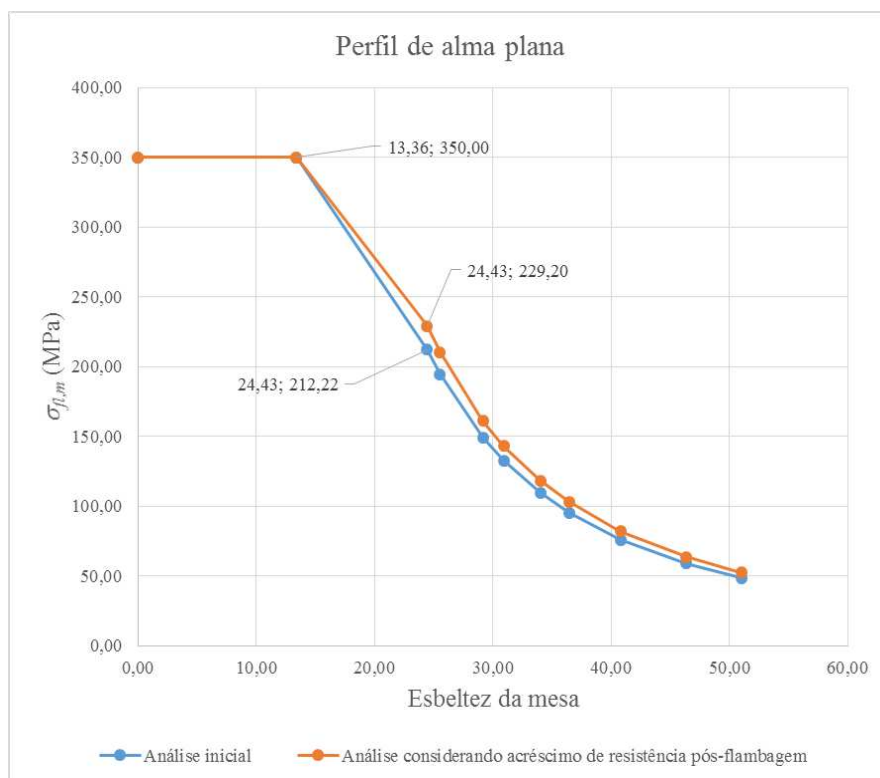


FIGURA 7: Gráfico $\sigma_{fl,m}$ versus b/t para o perfil de alma plana

FONTE: Autoria própria.

O Quadro 2 mostra valores da tensão média de flambagem elástica do modelo 2S. Com esses dados e através de análise paramétrica com a norma foi possível realizar o gráfico da Figura 8.

O Quadro 3 mostra valores da tensão média de flambagem elástica para o modelo 3S. Com esses dados e análise paramétrica com a norma foi possível realizar o gráfico da Figura 9.

QUADRO 2: Valores analíticos de esbeltez superior e esbeltez intermediária e respectivas tensões com acréscimo de resistência pós flambagem do modelo numérico 2S.

Modelo 2S	$\sigma_{fl,m}$ (MPa)	λ	Acréscimo de resistência pós flambagem (MPa)	Modos de flambagem
	108,06	41,82	116,70	Flambagem Elástica
	126,52	38,33	136,64	
	136,19	36,80	147,09	
	156,35	34,07	168,86	
	166,84	32,86	180,19	
	177,62	31,72	191,83	
	188,63	30,67	203,72	
	210,91	28,75	227,78	
	220,35	27,98	237,98	

FONTE: Autoria própria.

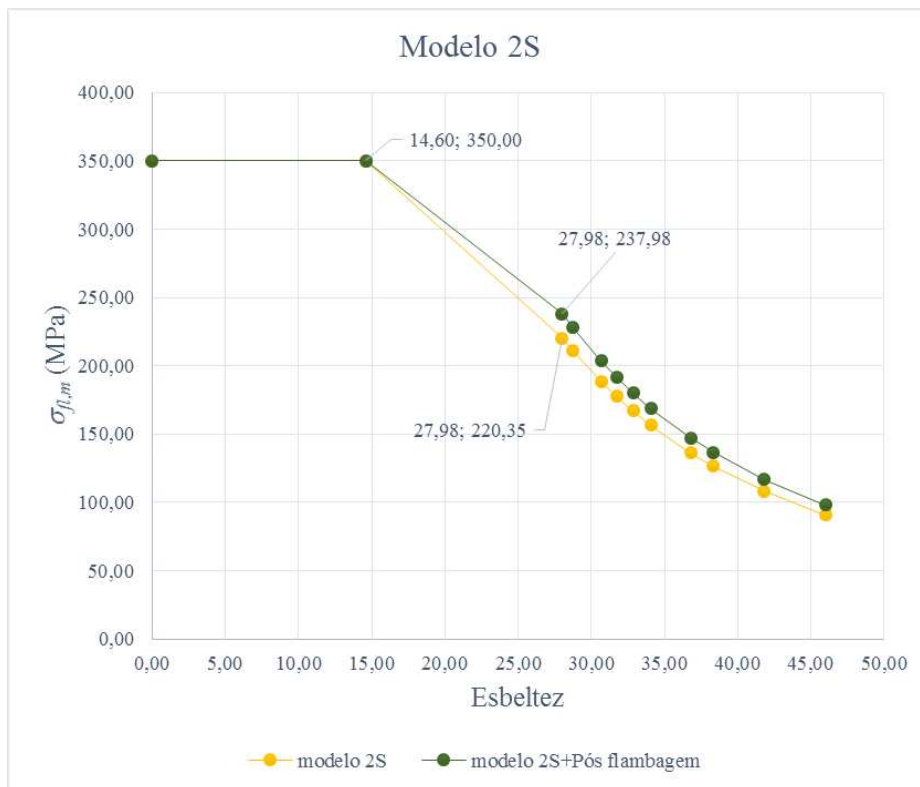


FIGURA 8: Gráfico $\sigma_{fl,m}$ versus esbeltez para o modelo 2S.

FONTE: Autoria própria.

QUADRO 3: Valores analíticos de esbeltez superior e intermediária e respectivas tensões com acréscimo de resistência pós flambagem do modelo numérico 3S.				
Modelo 3S	$\sigma_{fl,m}$ (MPa)	Esbeltez da mesa (λ)	Acréscimo de resistência pós flambagem (MPa)	Modos de Flambagem
	91,08	46	98,3664	Regime elástico
	109,96	41,82	118,7568	
	141,58	36,8	152,9064	
	164,83	34,07	178,0164	
	189,82	31,72	205,0056	
	202,96	30,67	219,1968	
	223,76	27,89	241,66	λ_{sup}

FONTE: Autoria própria.

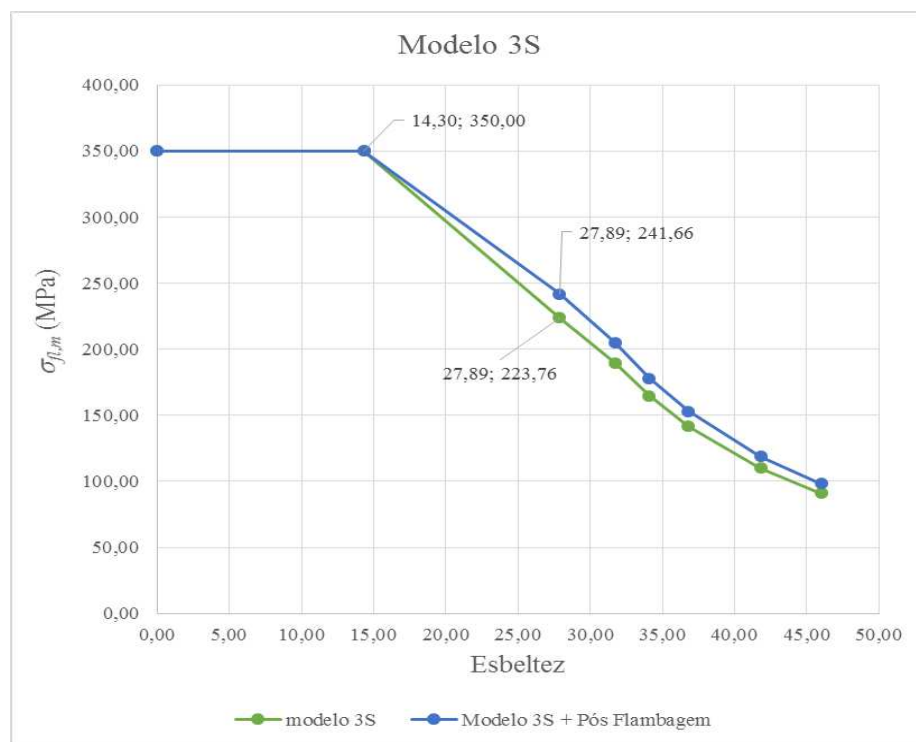


FIGURA 9: Gráfico $\sigma_{fl,m}$ versus esbeltez para o modelo 3S.

FONTE: Autoria própria.

A Figura 10 faz uma comparação entre as fases elásticas do perfil de alma plana e o perfil de alma senoidal com chapa de topo.

Com base nesses resultados foi possível realizar o gráfico comparativo para esses três perfis, considerando o acréscimo de 8% de resistência pós flambagem, conforme mostra a Figura 11.

Para uma mesma esbeltez, os perfis de

alma senoidal apresentaram melhor desempenho com relação ao suporte das tensões advindas da compressão axial, quando comparado com o desempenho do perfil de alma plana. Além disso, a flambagem local na mesa se inicia em limites de esbeltez mais elevados, sendo possível atingir tensões de escoamento sem a ocorrência de flambagem local para maior intervalo de esbeltez.

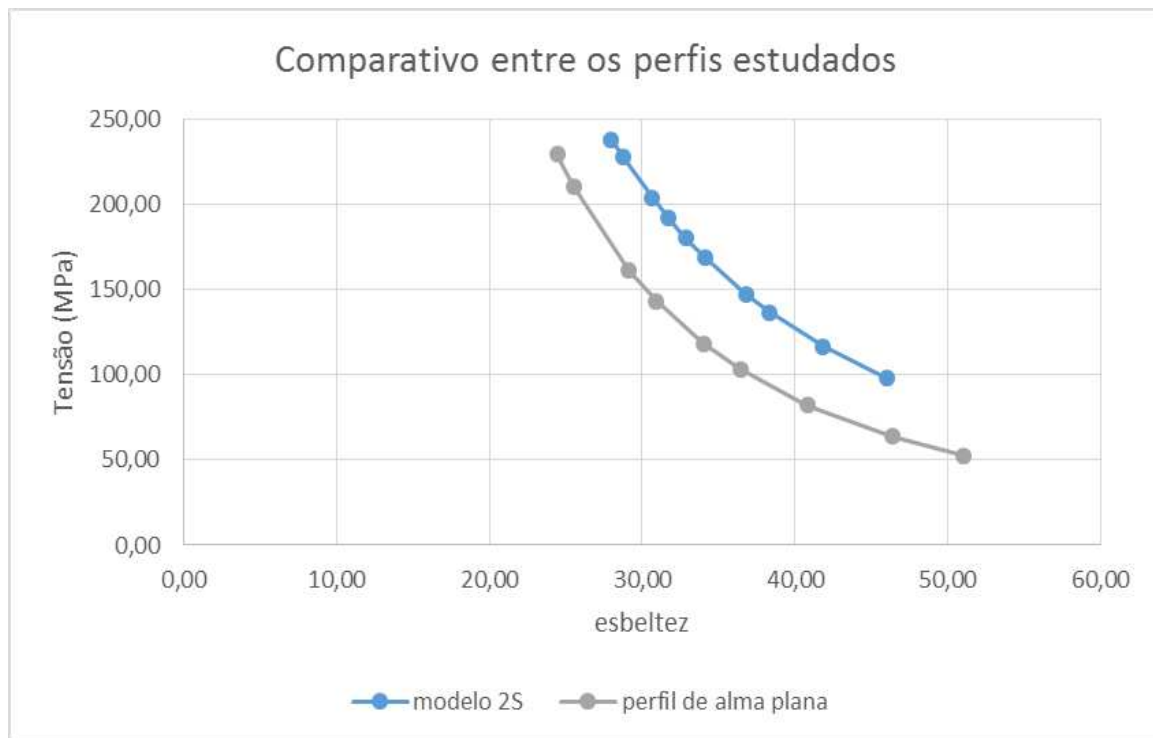


FIGURA 10: Gráfico comparativo da fase elástica de $\sigma_{fl,m}$ versus esbelteza para o perfil senoidal 2S e o perfil de alma plana.

FONTE: Autoria própria.

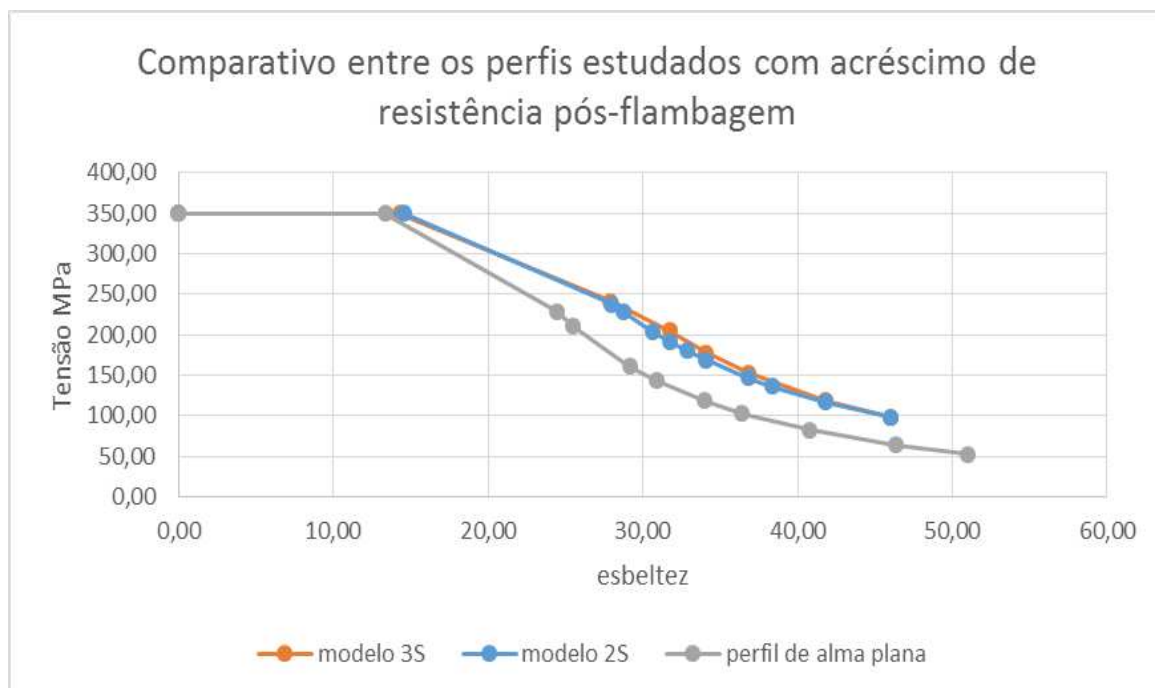


FIGURA 11: Gráfico comparativo de $\sigma_{fl,m}$ versus esbelteza com acréscimo de resistência pós flambagem.

FONTE: Autoria própria.

4.2. PROPOSIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ESBELTEZ EM PERFIS DE ALMA SENOIDAL

Ao se analisar as prescrições para os perfis de alma plana soldados e laminados conforme a norma NBR 8800 (ABNT, 2008),

observa-se que os valores limites de esbelteza que separam o escoamento da mesa, o colapso por flambagem inelástica e o colapso no regime elástico são os mesmos ao se substituir o valor $k_c=0,763$. Desta forma, é possível encontrar os

valores limites iniciais de referência $(b/t)_{lim}$, $(b/t)_i$ e $(b/t)_{sup}$ (Equações 6, 7 e 8 respectivamente) ilustrados na Figura 12.

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \text{Eq.[6]}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_i = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \text{Eq.[7]}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{sup} = 1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \text{Eq.[8]}$$

Em que:

$(b/t)_{lim}$ = esbeltez limite da mesa para um perfil de alma plana (adimensional);

$(b/t)_i$ = esbeltez intermediária da mesa para um perfil de alma plana (adimensional);

$(b/t)_{sup}$ = esbeltez superior da mesa para um perfil de alma plana (adimensional);

A partir dos resultados observados no item 4.1 é possível realizar um comparativo global relativo à flambagem local na mesa com base da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), considerando k_c

fixo, igual a 0,763. Sabe-se que o valor da relação entre o módulo de elasticidade e da resistência ao escoamento do aço do perfil, utilizados neste presente estudo, é invariável conforme mostra a Equação 9.

$$\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \sqrt{\frac{200000}{350}} = 23,90 \quad \text{Eq.[9]}$$

Em que:

E = módulo de elasticidade (MPa);

f_y = resistência ao escoamento (MPa);

Diante disso é possível realizar um comparativo entre os valores encontrados como parâmetros de esbeltez dos perfis de alma senoidal e dos perfis de alma plana ao se fazer valer a igualdade proposta por meio da Equação 10.

$$\lambda = n \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = n \cdot 23,90 \quad \text{Eq.[10]}$$

Em que:

λ = esbeltez da mesa para perfis de alma senoidal (adimensional);

n = coeficiente quantificador (adimensional);

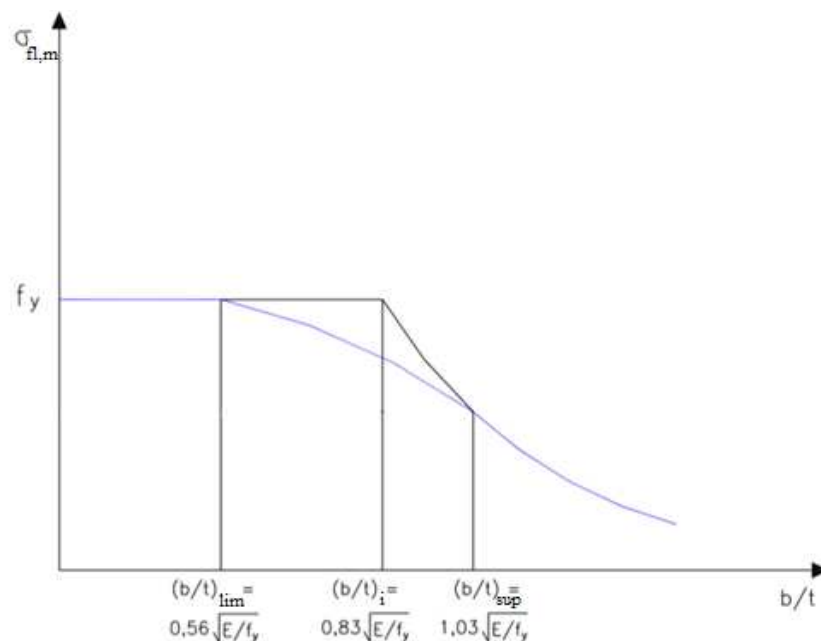


FIGURA 4.12: Gráfico tensão média versus esbeltez para perfis de alma plana.

FONTE: SOUZA (2006).

Sendo que n é um coeficiente variável, adimensional, quantificador para os parâmetros de esbeltez.

Tendo em mãos os resultados para os perfis dos modelos 2S e 3S, e considerando a igualdade proposta na Equação 10, pôde-se encontrar o valor de n e formular equações paramétricas com base nas equações dos perfis de alma plana, para expressar o valor da esbeltez limite (λ_{lim}), esbeltez intermediária (λ_i) e esbeltez superior (λ_{sup}) dos perfis de alma senoidal. O Quadro 4 exhibe os resultados finais

que expressam os valores dos parâmetros de esbeltez de cada perfil estudado em função do modo de elasticidade e da resistência ao escoamento do perfil, considerando k_c igual a 0,763.

Posteriormente, traçou-se as curva de tensão de início de flambagem para os modelos 2S e 3S como mostram as Figuras 13 e 14, respectivamente, sendo λ a esbeltez da mesa para perfis de alma senoidal calculada conforme Equação 5, e $\sigma_{fl,m}$ a tensão média de flambagem elástica.

QUADRO 4: Resultados finais dos parâmetros de esbeltez para cada modelo estudado, em função do módulo de elasticidade e da resistência ao escoamento do aço.

Perfil	Esbeltez		
	Limite	Intermediária	Superior
Alma plana	$0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,03 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Modelo 2S	$0,61 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,87 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,17 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Modelo 3S	$0,59 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,85 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,16 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

FONTE: Autoria própria.

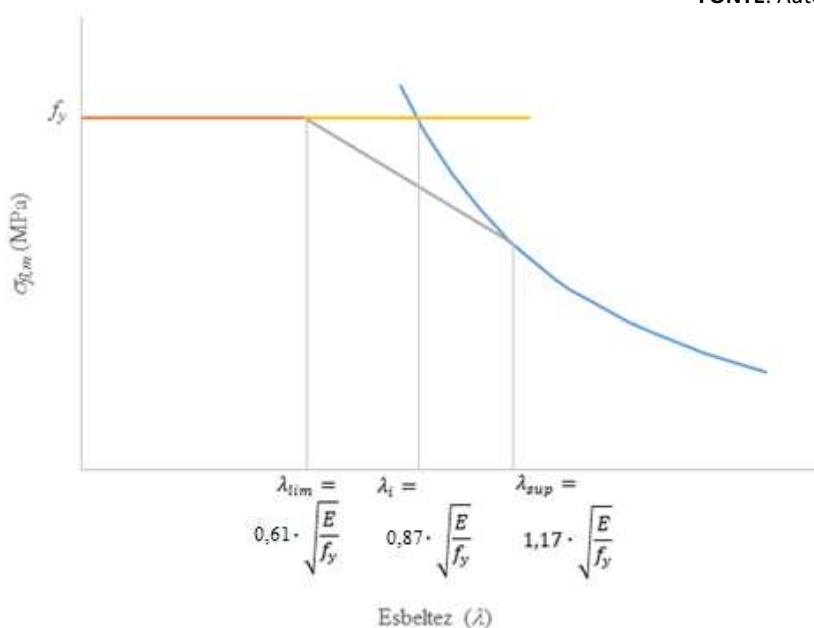


FIGURA 13: Gráfico tensão média versus esbeltez para o modelo 2S.

FONTE: Autoria própria.

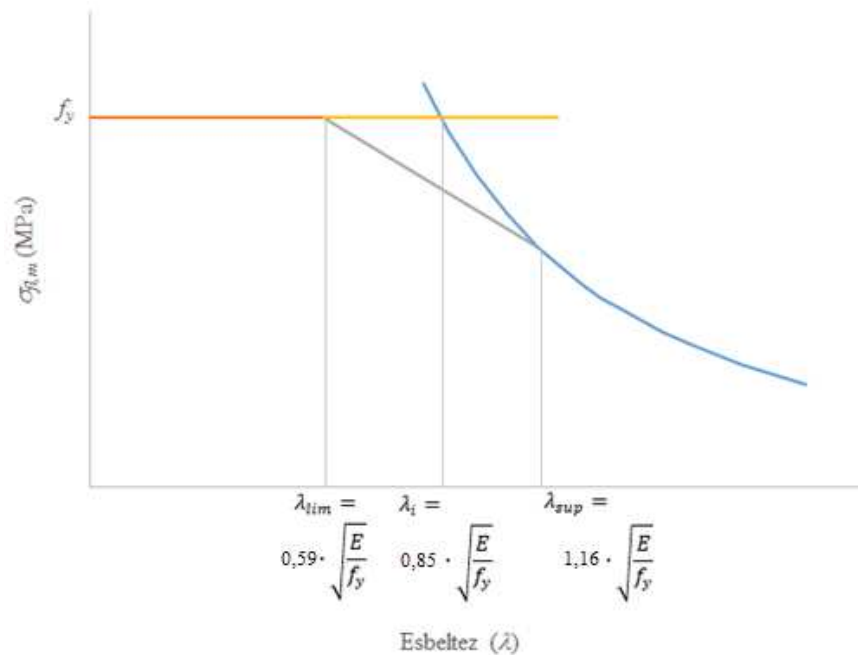


FIGURA 4.14: Gráfico tensão média versus esbelteza para o modelo 3S.

FONTE: Autoria própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os perfis de alma senoidal quando comparados aos perfis de alma plana, têm um bom desempenho frente às tensões advindas da compressão axial, conseguindo atingir a capacidade resistiva ao escoamento do aço sem ocorrência de flambagem local nas mesas para perfis mais esbeltos, tendo alcançado nesse estudo aproveitamento de até 8%.

Os modelos numéricos desse estudo foram representativos, alcançando bons resultados, os quais puderam ser utilizados na proposição de metodologia de cálculo de limites de esbelteza, esbelteza superior e intermediária. Os perfis de alma senoidal apresentaram parâmetros de esbelteza semelhantes, acusando uma boa modelagem numérica.

Quanto ao estudo da carga crítica de flambagem elástica, pesquisas anteriores sugeriram que as tensões residuais de compressão sejam equivalentes a 40% da resistência ao escoamento do aço, para perfis submetidos a compressão axial, e a tensão crítica de flambagem elástica igual a 60% de f_y . Isso posto, os modelos 2S e 3S apresentaram desempenho satisfatório no

que tange os valores limítrofes prescritos em norma, obtendo diferença de apenas 3% a ela. Observaram-se, também, que o colapso por flambagem elástica em perfis de alma senoidal ocorria para perfis até 11% mais esbeltos, quando comparado à perfis de alma plana, devido ao fato de a alma não absorver tensões longitudinais, fazendo com que a FLM ocorra como um efeito isolado nas mesas.

O limite superior para coeficiente de flambagem (k_c) de 0,763, proposto pela norma ABNT NBR8800:2008 de perfis de alma plana no grupo 5, atende bem as características de engastamento da alma com as mesas do perfil de alma senoidal, podendo ser aplicado no estudo de FLM para esses perfis quando submetidos à compressão axial. Dessa forma foi possível afirmar que a alma senoidal forneceu condições de vinculação semelhantes ao engastamento elástico de perfis de alma plana.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço à CODEME ENGENHARIA AS, FAPEMIG, CAPES e os demais envolvidos pelo apoio e suporte prestado na execução deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 8800:2008. Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, Brasil.

CASTRO E SILVA, A. L.R de, 2006 - **Análise Numérica Não-Linear Da Flambagem Local De Perfis De Aço Estrutural Submetidos À Compressão Uniaxial** – Tese de doutorado, Programa De Pós Graduação De Engenharia De Estruturas Da Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

GARTNER, 2012- **Sinbeam (corrugated web beam)** - Technical Documentation, Zeman & Co Gesellschaft mbH, Vienna, Austria

PIMENTA, R.J., 2008- **Perfis de Alma Senoidal: Proposição de Métodos de Cálculo e Análise da Confiabilidade Estrutural** – Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

PINTO, E.L., 2008- **Análise Teórico-Experimental da Flambagem Local de Mesas em Perfis de Alma Senoidal** – Projeto de Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

PLAIS, W., 2005- **Perfis de Alma Senoidal** – Documento técnico da Codeme Engenharia, Brasil.

MARTINS, A.G.,2009. **Estudo Do Comportamento De Vigas Mistas Com Perfil De Alma Senoidal** – Tese, Programa De Pós Graduação De Engenharia De Estruturas Da Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

RESENDE, C.C., 2006 **Utilização do perfil de alma senoidal em Galpão** – Artigo técnico Fumec, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

SALMON, C.G. & JOHNSON, J.E., 1990. **Steel Structures. Design and Behavior**, Harper Collins College Publishers, 4ª ed.,USA.

SOUZA, D.G., 2006. **Estudo de Flambagem Local de Mesa de Perfis I com Alma Senoidal via Análise Não-linear pelo MEF** – Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

TIMOSHENKO S. P. AND GERE, J. M., **Theory of stability**, 2nd ed., NCGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1961.

VERÍSSIMO, G.S., 2009- **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo de seu comportamento**– Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.