INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Luciana Ferreira Carvalho

Otimização de Vigas com Alma Senoidal

Trabalho de Graduação 2010

Civil Aeronáutica

Luciana Ferreira Carvalho

Otimização de Vigas com Alma Senoidal

Orientador Francisco Alex Correia Monteiro, M.Sc.

Engenharia Civil Aeronáutica

São José dos Campos Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial Instituto Tecnológico de Aeronáutica Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) Divisão de Informação e Documentação

> Carvalho, Luciana Otimização de Vigas com Alma Senoidal São José dos Campos, 2010. 32f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil – Instituto Tecnológico de Aeronáutica,

2010. Orientador: Professor Francisco Alex Correia Monteiro - ITA

1. Vigas. 2. Senoidal. 3. Corrugada. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARVALHO, Luciana. **Otimização de Vigas com Alma Senoidal**. 2010. 32f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Luciana Ferreira Carvalho TÍTULO DO TRABALHO: Otimização de Vigas com Alma Senoidal TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2010

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Luciana Ferreira Carvalho Rua Carlos Vasconcelos, 2520 apto 301 Joaquim Távora 60115-171 Fortaleza - CE Otimização de Vigas com Alma Senoidal

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Luciana F. Comalha Luciana Ferreira Carvalho

Autor

Francisco Alex Correia Monteiro, M:Sc. Orientador

Gliun Muller Eliseu Lucena Nete

Coordenador do Curso de Engenharia Civil Aeronáutica

São José dos Campos, 22 de Novembro de 2010

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais que estiveram ao meu lado sempre que precisei e quando achava que não precisava.

Agradeço à minha turma CIVIL 10 que esteve sempre unida nesses 3 anos.

Agradeço às minhas amigas e amigos que, nesses 5 anos de ITA, tornaram-se minha segunda família.

Agradeço à Deus que nunca me deixou desistir dessa luta.

Resumo

Neste trabalho estuda-se o comportamento de vigas de seção I com alma senoidal para o momento crítico elástico no estado limite de flambagem lateral com torção sujeita a um carregamento e comprimento fixos. O momento resistente de cálculo é definido de acordo com os procedimentos recomendados pela Zeman (empresa fabricante européia), que considera apenas a resistência da mesa comprimida. Este valor é comparado com o valor obtido pela NBR 8800 (2008) e calculado também o momento crítico utilizando o software de elementos finitos SolidWorks. Quando comparados os resultados de acordo com a norma brasileira, a norma adaptada e o modelo de elementos finitos percebeu-se sempre um aumento do momento resistente com a espessura da mesa e para os casos da modelagem um aumento também quando consideravam-se maiores quantidades de semi-ondas. Concluiu-se que o resultado da modelagem também fornecia valores mais completos por considerar a quantidade de semi-ondas no cálculo do momento resistente, o que não ocorre no caso do cálculo de acordo com a norma brasileira e a norma adaptada.

Abstract

This paper studies the behavior of sinusoidal-web beam under the limit states of lateral torsional buckling under a fixed length and loading. The resistance moment calculation is defined in accordance with the procedures recommended by Zeman, in which the sunusoidal web is neglected in computing the geometric properties and compared with the value obtained by NBR 8800. It also calculated the critical moment using SolidWorks. Comparing the results according to the Brazilian standard, the adaptation of Brazilian standard and the finite element model was possible to conclude that the resistance moment increase with the thickness and for the modeling cases it increases also when it was considered larger quantities of semi-waves. It was concluded that the modeling results also provided more complete values by considering the amount of half-waves in calculating the resistance moment, which is not considered in the case of the calculation according to the Brazilian standard and adapted standard.

Conteúdo

| 1 | 9 | |
|--------------|-----------------------------------------|----|
| | 1.1 Perfis de Alma Senoidal | |
| | 1.2 Objetivo | |
| 2 | Flambagem Lateral com Torção | 15 |
| | 2.1 Considerações Iniciais | |
| | 2.2 Momento Resistente Nominal | |
| | 2.3 Momento Resistente Nominal Adaptado | |
| | 2.4 Comparação dos Resultados | |
| 3 | Modelo Numérico | 23 |
| | 3.1 Considerações Iniciais | |
| | 3.2 Perfil de Projeto | |
| | 3.3 Condições de Contorno | 25 |
| | 3.4 Carregamento | 25 |
| | 3.5 Resultados | |
| 4 | Comparação dos Resultados | 32 |
| 5 | Conclusão | 36 |
| \mathbf{R} | deferências | 38 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Perfis de Alma Corrugada

Estruturas de aço já vem sendo empregadas há aproximadamente 150 anos na construção civil e com o desenvolvimento de novas tecnologias a sua utilização na construção vem se difundindo cada vez mais. O perfil mais comum nas estruturas metálicas é o perfil I laminado com mesas paralelas. Entretanto, com o aumento do vão livre na estrutura, tornase necessária a utilização de perfis com maiores dimensões, resultando em um maior peso da peça que, normalmente, não compensa o ganho no aumento de sua resistência.

Com a utilização de perfis I soldados é possível construir perfis mais esbeltos e, consequentemente, peças mais leves. Entretanto, com o aumento da altura da alma, a instabilidade desta aumenta e com isto torna-se necessária a utilização de enrijecedores transversais para solucionar o problema, mas com um aumento considerável do custo de confecção da peça. Logo, pode-se perceber que o principal problema na utilização de perfis metálicos em I referese à sua aplicação para grandes vãos levando a resultados antieconômicos. Uma proposta de solução para este problema é a utilização de perfis I com alma corrugada que acopla vantagens de redução da espessura da alma, diminuição do peso da estrutura, aumento da capacidade de carga e redução dos custos totais.

Os perfis de alma corrugada caracterizam-se por ser um perfil em I com mesas paralelas e alma de forma corrugada com o eixo perpendicular às mesas. A Figura 1.1 apresenta algumas configurações possíveis para o perfil corrugado e a Figura 1.2 apresenta algumas imagens deste tipo de perfil.



Figura 1.1 Viga I com perfil corrugado.

1.1.1 Perfis com corrugação trapezoidal

Os perfis de alma trapezoidal caracterizam-se por possuírem uma corrugação com curva trapezoidal conforme apresentado na Figura 1.1. Em estudos realizados concluiu-se que a resistência à flambagem lateral com torção, no regime elástico, para vigas com alma trapezoidal sujeita a momentos nas extremidades possui valor de 15-37 % superiores à de vigas com alma plana e de 12-20% superior para carregamentos concentrados no meio do vão, concluindo que as equações utilizadas para calcular o momento resistente com perfis de alma plana subestimam a capacidade das vigas com alma corrugada, para os casos estudados.

Neste caso de corrugação, a flambagem local corresponde à instabilidade das partes planas dos painéis, enquanto que a flambagem global é caracterizada por uma instabilidade nos painéis da corrugação, onde foi possível observar também que a flambagem global é predominantemente em painéis de largura pequena (corrugação densa) e a flambagem local em painéis largos.

Analizando-se a resistência após a flambagem verificou-se um aumento de até 53% após





Figura 1.2 Perfis com alma trapezoidal e senoidal.

a ocorrência da flambagem da alma em perfis cuja flambagem é predominatemente local, enquanto que a resistência pós-flambagem para o caso global é insignificante.

1.1.2 Perfis com corrugação senoidal

Os perfis de alma senoidal caracterizam-se como um perfil de seção I de alma corrugada com forma senoidal e com mesas constituídas de chapas planas. A principal vantagem deste tipo de perfil deve-se à forma corrugada da alma que gera um aumento considerável da rigidez à flexão e da resistência da alma às tensões de cisalhamento e a efeitos localizados conseguindo-se, então, um perfil pouco susceptível à flambagem quando comparado aos perfis de alma plana equivalente e a vantagem de não possuir a flambagem local dos sub-painéis apresentado para o caso de perfil com corrugação trapezoidal.

Devido às características de resistência obtidas, consegue-se reduzir consideravelmente a espessura de alma (com dimensão a partir de 2 mm) obtendo relações altura/espessura de até 600, enquanto que para perfis de alma plana esta relação normalmente não supera 250.

Nos perfis de alma plana sujeitos à flexão em torno do eixo principal de inércia, um dos tipos de instabilidade da viga é a flambagem da alma. Com a viga de alma senoidal, entretanto, consegue-se um aumento da rigidez à flexão na direção perpendicular ao seu plano, resultando num aumento da capacidade de resistir às cargas de flexão.

Como principais vantagens da utilização de perfis de alma senoidal tem-se: (i) a maior

resistência à flambagem da alma permitindo que não seja necessária a utilização de enrijecedores transversais; (ii) aumento da altura útil das seções do perfil, conseguindo-se alcançar maiores distâncias entre vãos (reduz o número de pilares da obra e, consequentemente, de elementos de fundação); (iii) estruturas mais leves e de mais fácil construção.

Como principais desvantagens deste tipo de perfil tem-se: (i) a não existência de norma brasileira para o dimensionamento estrutural; (ii) desconhecimento por parte dos projetistas das vantagens da utilização deste perfil; (iii) falta de estudos mais detalhados relacionados ao projeto e execução de ligações.

Os perfis de alma corrugada começaram a ser produzidos pela empresa sueca Ranabalken em 1966 inicialmente para serem utilizados em estruturas de pontes. Com o desenvolvimento da tecnologia, empresas como GLP Corrugated Plate Industry, dos Países Baixos, e a Zeman, da Áustria, passaram a investir também em sistemas estruturais com vigas de alma corrugada. A primeira ponte a ser construída com este tipo de corrugação foi a Cognac Bridge em 1986, apresentada na Figura 1.3.



Figura 1.3 Ponte Cognac na França.

Atualmente as principais aplicações para este tipo de perfil são os galpões comerciais e edifícios industriais. Outras aplicações bastante comuns, também, são as passarelas de pedestres, estruturas de correias transportadoras e silos. No Brasil, a única empresa fabricante de vigas com alma senoidal é a Codeme Engenharia. Seus perfis podem possuir alturas de 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200 mm, espessura da alma de 2 ou 3 mm somente para amplitudes de onda de 40 ou 43 mm, respectivamente. Para as dimensões da mesa pode-se ter uma largura entre 125 e 350 mm e espessura de 4,75 a 19 mm. A alma senoidal possui comprimento de onda fixo de 155 mm e o comprimento máximo da viga é de 16,0 m. Suas características construtivas estão apresentadas na Figura 1.4.



Figura 1.4 Características construtivas dos perfis da Codeme Engenharia.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de vigas de alma senoidal comparativamente com vigas com perfil de alma plana, analisando as possíveis configurações de dimensões do perfil para o mesmo tipo de carregamento e tamanho de vão livre.

Para uma melhor comparação dos resultados e influência de perfil com alma senoidal, escolheu-se um perfil com condições de contorno e dimensões padronizadas, fez-se variar apenas a espessura da alma e o número de semi-ondas na viga e serão calculados: (i) carregamento equivalente na viga utilizando os procedimentos da NBR 8800 (2008) para a flambagem lateral com torção de vigas esbeltas; (ii) carregamento equivalente utilizando os procedimentos de norma adaptados por FAKURY *et al.* (2006); (iii) carregamento crítico de acordo com os resultados de modelagem da viga no software de elementos finitos SolidWorks (2009). O presente trabalho pretende comparar e analisar os três resultados de carregamento crítico para a flambagem lateral com torção de vigas esbeltas com perfil senoidal.

Capítulo 2

Flambagem Lateral com Torção

O fenômeno da flambagem lateral com torção caracteriza-se por uma perda da estabilidade lateral da viga assumindo configurações deformadas conforme apresentado na Figura 2.1, onde as seções podem torcer e empenar de forma conjunta deixando, portanto, de ser planas. Neste caso, a flambagem global da viga se dá de maneira que em suas seções transversais coexistem tensões normais de tração e de compressão.

Percebe-se então uma relação direta entre as condições de contorno e carregamento a que está sendo submetida a viga e a sua resistência à flambagem. Para maiores vãos livres entre as restrições laterais observa-se uma maior susceptibilidade à flambagem da peça e uma viga com curvatura simples também está mais propensa a sair lateralmente que uma viga sob curvatura dupla.

2.1 Considerações Iniciais

O cálculo do momento resistente à flambagem lateral com torção para vigas de alma senoidal ainda não é prevista em nenhuma norma de projeto. Atualmente, as duas principais abordagens de cálculo utilizadas pelos projetistas são: (i) o perfil da alma pode ser simulado por um modelo de treliça, onde as mesas são representadas pelos banzos responsáveis pela resistência ao momento fletor e à força normal, e a alma corresponde aos montantes e diagonais, responsáveis pela resistência à força cortante; (ii) modelo de norma adaptado em que se desconsidera as características da alma na resistência da viga à força normal e ao momento fletor.



Figura 2.1 Configuração final para a flambagem lateral com torção.

No segundo caso, as características da alma podem ser desprezadas no cálculo do momento resistente da viga pois, devido à sua forma corrugada da alma, as tensões normais causadas por momentos fletores e força normal são praticamente nulas na alma, de acordo com PIMENTA (2008), resultando em uma contribuição praticamente nula no momento resistente total da viga.

A segunda abordagem de cálculo será adotada neste projeto e as denominações das dimensões utilizadas são apresentadas na Figura 2.2.



Figura 2.2 Dimensões da viga senoidal.

O momento fletor resistente relativo à flambagem lateral com torção será calculado a partir da resistência de vigas bi-apoiadas sujeita a um carregamento constante de $q = 1 \times 10^{-5}$ kN/cm. Serão adotadas como dimensões fixas da viga: altura da alma h = 40 cm, espessura da alma $t_w = 0, 2$ cm e largura da mesa $b_f = 25$ cm e, de acordo com o modelo de elementos finitos, será calculado o momento resistente para as espessuras da mesa de $t_f = 5, 10, 15, 20$ mm.

2.2 Momento Resistente Nominal

De acordo com a NBR 8800 (2008), o momento fletor resistente para a flambagem lateral com torção é calculado conforme apresentado na Equação (2.1). A Figura 2.3 apresenta a variação da resistência nominal para o momento fletor $M_{Rd} = M_{Nd}/1$, 1 em função do parâmetro de esbeltez λ para C_b igual a 1,0, onde pode-se perceber que o momento resistente da viga pode ser representado por três trechos de curva de acordo com o seu parâmetro de esbeltez em comparação com o parâmetro correspondente à plastificação λ_p e ao início do escoamento λ_r :



Figura 2.3 Momento fletor resistente de acordo com o indice de esbeltez.

$$M_{Nd} = \begin{cases} k_{pg} W_{xc} f_y, \text{ se } \lambda \leq \lambda_p \\ C_b k_{pg} \left[1 - 0, 3 \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] W_{xc} f_y \leq k_{pg} W_{xc} f_y, \text{ se } \lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{C_b k_{pg} \pi^2 E W_{xc}}{\lambda^2} \leq k_{pg} W_{xc} f_y, \text{ se } \lambda > \lambda_r \end{cases}$$
(2.1)

onde

E = módulo de elasticidade longitudinal do aço

 $W_x = \text{módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção}$ $C_b = \frac{12, 5M_{MAX}}{2, 5M_{MAX} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$ $\lambda = L_b/r_{Ty}$ $\lambda_p = 1, 10\sqrt{E/f_y}$ $\lambda_r = \pi\sqrt{E/(0, 7f_y)}$ $k_{pg} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r} \left(\frac{h}{t_w} - 5, 70\sqrt{\frac{E}{f_y}}\right)$

 com

 $L_b =$ comprimento destravado

 M_A, M_B, M_C = módulo do momento fletor máximo a um quarto, metade e a três quartos

do comprimento destravado

$$W_x = \frac{2I_x}{d}$$

$$I_{yt} = \frac{1}{12} \left(\frac{ht_w^3}{6} + t_f b_f^3 \right)$$

$$A_{yt} = \frac{ht_w}{6} + t_f b_f$$

$$a_r = \frac{ht_w}{b_f t_f} \le 10$$

$$I_x = \frac{t_w h^3 + b_f (d^3 - h^3)}{12}.$$

Para o cálculo do momento resistente serão adotados: $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$, L = 600 cm, $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$.

Considerando apenas a situação da NBR 8800 (2008), é possível encontrar os valores

| | | | - | 5 | 1 | | | |
|------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-----------|
| t_f (cm) | $I_x \ (\mathrm{cm}^4)$ | $W_x \ (\mathrm{cm}^2)$ | $I_{yt} \ (\mathrm{cm}^4)$ | $A_{yt} \ (\mathrm{cm}^2)$ | r_{ty} (cm) | λ | a_r | k_{pg} |
| $0,\!5$ | $1,\!13{\times}10^4$ | $5,52{	imes}10^2$ | $6{,}51{\times}10^2$ | $1,\!38{	imes}10^1$ | $6,\!86$ | 87,46 | 0,64 | 0,982 |
| $1,\!0$ | $2,\!21\!\times\!10^4$ | $1{,}05{\times}10^3$ | $1,\!30\!	imes\!10^{3}$ | $2{,}63{\times}10^1$ | 7,03 | $85,\!33$ | 0,32 | 0,990 |
| $1,\!5$ | $3,\!34{\times}10^4$ | $1,55{	imes}10^3$ | $1{,}95{\times}10^3$ | $3,\!88{\times}10^1$ | $7,\!09$ | 84,60 | 0,21 | 0,993 |
| $2,\!0$ | $4{,}52{\times}10^4$ | $2{,}05{\times}10^3$ | $2,\!60\!	imes\!10^{3}$ | $5,\!13{	imes}10^1$ | 7,12 | 84,24 | $0,\!16$ | $0,\!995$ |

Tabela 2.1 Geometria da seção plana

Tabela 2.2 Momento resistente para viga plana.

| t_f (cm) | $M_{Nd} (\rm kN cm)$ |
|------------|------------------------|
| $0,\!5$ | $1{,}19{\times}10^4$ |
| 1,0 | $2{,}32{\times}10^4$ |
| 1,5 | $3,\!44{	imes}10^4$ |
| 2,0 | $4{,}58{\times}10^4$ |

apresentados na Tabela 2.1 para a situação da viga plana e os valores de momento resistente nominal para a viga plana equivalente são apresentados na Tabela 2.2.

2.3 Momento Resistente Nominal Adaptado

Para o cálculo do momento resistente nominal para a flambagem lateral com torção a Zeman recomenda desprezar a alma e obter o momento resistente a partir da força axial resistente da mesa comprimida, considerando-a como uma barra isolada de seção retangular sujeita à instabilidade por flexão em relação a seu eixo de maior inércia, de acordo com o modelo de treliça. FAKURY *et al.* (2006) adota um método com base nas normas americanas e despreza-se a alma senoidal no cálculo das propriedades geométricas da seção transversal, de acordo com o modelo convencional modificado.

Neste projeto, o cálculo do momento resistente será feito de modo análogo ao item anterior com as considerações de desprezar as características da alma no cálculo, de acordo com a norma adaptada por FAKURY *et al.* (2006).

A Tabela 2.3 apresenta os parâmetros utilizados para no cálculo e a Tabela 2.4 apresenta o momento resistente de cálculo para a norma adaptada.

| rabela 210 Coomotina da beção beneraan. | | | | | | | | |
|-----------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|----------|
| t_f (cm) | $I_x \ (\mathrm{cm}^4)$ | $W_x \ (\mathrm{cm}^2)$ | $I_{yt} \ (\mathrm{cm}^4)$ | $A_{yt} \ (\mathrm{cm}^2)$ | r_{ty} (cm) | λ | a_r | k_{pg} |
| $0,\!5$ | $1,\!03{	imes}10^4$ | $5,\!00\!\times\!10^2$ | $5,\!61{	imes}10^2$ | $1,25{	imes}10^1$ | 7,22 | 83,1 | 0,64 | 0,982 |
| $1,\!0$ | $2,\!10{\times}10^4$ | $1,\!00\!	imes\!10^{3}$ | $1,\!30\!	imes\!10^{3}$ | $2{,}50{\times}10^1$ | 7,22 | 83,1 | 0,32 | 0,990 |
| $1,\!5$ | $3,\!23 \times 10^4$ | $1,50{\times}10^3$ | $1,\!95{\times}10^3$ | $3,75{\times}10^1$ | 7,22 | 83,1 | 0,23 | 0,993 |
| $2,\!0$ | $4,\!41 \times 10^4$ | $2,\!01\!\times\!10^{3}$ | $2,\!60\!	imes\!10^{3}$ | $5,\!00\!	imes\!10^{1}$ | 7,22 | 83,1 | $0,\!16$ | 0,995 |

Tabela 2.3 Geometria da seção senoidal

Tabela 2.4 Momento resistente para viga senoidal.

| t_f (cm) | $M_{Nd} (\rm kN cm)$ |
|------------|------------------------|
| $0,\!5$ | $1{,}58{\times}10^4$ |
| $1,\!0$ | $3,\!19{	imes}10^4$ |
| $1,\!5$ | $4,\!80{	imes}10^4$ |
| 2,0 | $6,\!42{	imes}10^4$ |

2.4 Comparação dos Resultados

Com os dados calculados é possível construir a Tabela 2.5 e o gráfico apresentado nas Figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 onde percebe-se que a diferença entre os valores de momentos resistentes para a flambagem lateral com torção considerando o cálculo para viga de alma plana equivalente e de alma senoidal utilizando a norma adaptada possuem valores bem parecidos, com o segundo valor maior que o primeiro devido à desconsideração das características da alma no cálculo.

| M_{norma} (kN cm) | $M_{senoidal}$ (kN cm) | $M_{senoidal}/M_{norma}$ | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| $1,19 \times 10^{4}$ | $1{,}58{\times}10^4$ | 1,32 | | | | | |
| $2,32{\times}10^{4}$ | $3,\!19{	imes}10^4$ | $1,\!37$ | | | | | |
| $3,44 \times 10^{4}$ | $4,\!80\!	imes\!10^4$ | $1,\!39$ | | | | | |
| $4,\!58{	imes}10^4$ | $6,42 \times 10^{4}$ | 1,40 | | | | | |

Tabela 2.5 Comparação dos resultados.



Figura 2.4 Momento resistente para a NBR 8800 e a norma adaptada para $t_f = 5$ mm.



Figura 2.5 Momento resistente para a NBR 8800 e a norma adaptada para $t_f = 10$ mm.



Figura 2.6 Momento resistente para a NBR 8800 e a norma adaptada para $t_f = 15$ mm.



Figura 2.7 Momento resistente para a NBR 8800 e a norma adaptada para $t_f = 20$ mm.

Capítulo 3

Modelo Numérico

3.1 Considerações Iniciais

Para o estudo numérico da viga com alma senoidal faz-se necessária uma análise utilizando um modelo de elementos finitos com o objetivo de comparar seus resultados de momento fletor resistente com aqueles sugeridos pela literatura apresentados no capítulo anterior. A modelagem é feita utilizando o software SolidWorks (2009) por permitir a parametrização da equação da alma da viga.

No modelo utilizado nesse projeto o material será considerado elástico, homogêneo e isotrópico com limite de escoamento $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$. Conforme recomendado pela norma brasileira, os níveis de tensões residuais existentes em perfis senoidais são de 30% da tensão de escoamento e com isto tem-se uma tensão residual de 7,5 kN/cm².

3.2 Perfil de Projeto

O modelo utilizado para a análise em elementos finitos possui as mesmas dimensões apresentadas no item anterior, com altura da alma de 400 mm, espessura da alma de 2 mm, largura das mesas de 250 mm e amplitude da onda de 20 mm constantes, fazendo-se variar apenas a espessura das mesas e o número de semi-ondas conforme apresenta a Tabela 3.1.

Para a modelagem da viga foi utilizado elemento de casca e a sua configuração indeformada é apresentada nas Figuras 3.1 e 3.2.

Com o objetivo de uma maior padronização das premissas e condições iniciais de projeto



Figura 3.1 Vista lateral da viga com alma senoidal para n = 30.



Figura 3.2 Vista superior da viga com alma senoidal para n = 30.

também foi pré-definida uma malha padrão a ser adotada no perfil. No modelo foi escolhida uma malha com dimensão de 50 mm e tolerância de 2,5 mm obtendo uma configuração de malha final conforme apresenta a Figura 3.3, ressaltando-se que para distinguir as faces superior e inferior dos elementos de casca o SolidWorks atribui cores diferentes a elas nos elementos gerados.

| $h_w \ (\mathrm{mm})$ | 400 | | | | |
|-----------------------|-----|----|----|----|----|
| $t_w \text{ (mm)}$ | 2 | | | | |
| $b_f \ (\mathrm{mm})$ | 250 | | | | |
| $t_f \text{ (mm)}$ | 5 | 10 | 15 | 2 | 0 |
| n | 10 | 20 | 30 | 40 | 60 |

Tabela 3.1 Características utilizadas para modelagem.

3.3 Condições de Contorno

As condições de contorno empregadas no modelo são aquelas definidas de modo a simular uma viga bi-apoiada. A Figura 3.4 apresenta a configuração da condição de contorno para uma extremidade da viga, estando a outra extremidade sob as mesmas condições. Como pode-se perceber foram impedidos os deslocamentos nas direções X, Y e Z da alma e na direção Y das mesas.

3.4 Carregamento

O carregamento adotado no modelo numérico é definido de modo a se ter uma carga uniforme para todas as vigas de 1×10^{-5} kN/cm.

Como o número de semi-ondas e a espessura da viga são variáveis, consequentemente cada viga possuirá um peso diferente o que influi consideravelmente na carga final a que está submetida cada viga. Para uma comparação mais eficiente dos resultados é utilizado o conceito de gravidade equivalente, onde se calcula a gravidade para a qual irá resultar numa carga total de 1×10^{-5} kN/cm. Estes valores serão inseridos no modelo da viga e com isso, independente do número de semi-ondas e da espessura da mesa, tem-se a mesma carga atuante para todos os casos.

O cálculo do comprimento total da alma de acordo com o número de semi-ondas segue a Equação (3.1):

$$L = \int_0^6 \sqrt{1 + f'(x)^2}$$
$$f(x) = 0,02 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x n}{6}\right).$$
(3.1)

e os valores encontrados são apresentados na Tabela 3.2.

Como o carregamento será aplicado por meio do conceito de gravidade equivalente, foi utilizada a Equação (3.2):

$$\gamma g V = Lq$$

$$\gamma g V = L \times 1$$

$$g = \frac{L}{\gamma V}$$
(3.2)



Figura 3.3 Configuração da malha para o perfil com alma senoidal com n = 30.



Figura 3.4 Condições de contorno utilizadas para modelagem da viga.

| n | L_{total} (m) |
|----|-----------------|
| 0 | 6,000 |
| 10 | 6,016 |
| 20 | 6,065 |
| 30 | $6,\!145$ |
| 40 | $6,\!255$ |
| 60 | 6,554 |

Tabela 3.2 Comprimento total da alma para cada número de semi ondas.

 Tabela 3.3 Gravidade equivalente para respectivos valores de espessura da alma e número de semi-ondas.

| $g (m/s^2)$ | $t_f \ (\mathrm{mm})$ | | | | |
|-------------|-----------------------|--------------|--------------|----------|--|
| n | 5 | 10 | 15 | 20 | |
| 0 | 0,038603 | 0,021964 | 0,015348 | 0,011795 | |
| 10 | $0,\!038577$ | $0,\!021955$ | $0,\!015344$ | 0,011793 | |
| 20 | $0,\!038501$ | 0,021931 | $0,\!015332$ | 0,011786 | |
| 30 | 0,038377 | 0,021890 | $0,\!015312$ | 0,011774 | |
| 40 | 0,038209 | 0,021835 | $0,\!015285$ | 0,011758 | |
| 60 | 0,037757 | 0,021687 | 0,015213 | 0,011715 | |

onde $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$, e V é o volume total da viga dado por

$$V = V_{mesa} + V_{alma}$$

$$V = 2b_f t_f + Lh t_w.$$
(3.3)

Utilizando os comprimentos totais da alma calculados e a equação da gravidade aqui apresentada é possível encontrar o valor da gravidade necessária para que todas as vigas estejam sujeitas ao mesmo carregamento uniforme. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 3.3.

| FC | | t_f (1 | nm) | |
|----|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| n | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 0 | $3,\!898\!	imes\!10^4$ | $7,\!191\!\times\!10^4$ | $1,\!002\!\times\!10^5$ | $1,034 \times 10^{5}$ |
| 10 | $5{,}002{\times}10^4$ | $7{,}789{\times}10^4$ | $1,\!183{	imes}10^5$ | $1{,}305{\times}10^5$ |
| 20 | $5{,}056{\times}10^4$ | $9,\!280\!\times\!10^4$ | $1{,}596{\times}10^5$ | $1{,}718{\times}10^5$ |
| 30 | $8{,}013{\times}10^4$ | $1,\!577{\times}10^5$ | $2,\!000\!\times\!10^5$ | $2{,}174{\times}10^5$ |
| 40 | $1,011 \times 10^{5}$ | $2,\!084\!	imes\!10^5$ | $2,\!487{	imes}10^5$ | $2{,}971{\times}10^5$ |
| 60 | $1{,}022{\times}10^5$ | $2,\!155\!\times\!10^5$ | $4,\!480\!	imes\!10^{5}$ | $3,\!692{	imes}10^5$ |

Tabela 3.4 Fator de carga para respectivas espessuras da mesa e número de semi-ondas.

3.5 Resultados

Após inserção dos dados e condições de projeto apresentados a modelagem foi executada para os 24 casos escolhidos e para a análise dos resultados utilizou-se o limite máximo de módulos de flambagem permitos pelo programa (200 modos).

Para comparação dos resultados foram escolhidos os primeiros modos de flambagem e verificou-se que podem existir modos somente locais, somente globais e modos acoplados com flambagem local e global. Os valores escolhidos são preferencialmente para flambagem global e apenas em situações sem flambagem global pura foram escolhidos o modo acoplado.

A apresentação dos resultados no SolidWorks é feita utilizando o conceito de fator de carga que representa o carregamento equivalente na viga para que esta esteja submetida ao momento apresentado. A Tabela 3.4 apresenta os valores de fator de carga crítica para as situações analisada e as Figuras 3.5 e 3.6 apresentam as configurações críticas quando a flambagem é puramente global e as Figuras 3.7 e 3.8 quando a flambagem é acoplada. Para vigas com mais de um modo global de flambagem foi escolhido o de menor valor de fator de carga (FC) por representar a situação mais crítica de projeto.

Com os resultados obtidos é possível contruir o gráfico apresentado na Figura 3.9 que apresenta o comportamento do fator de carga quando o valor da espessura da mesa é mantida constante. Com o gráfico apresentado é possível verificar que, com o aumento do número de semi-ondas, tem-se um aumento do carregamento crítico ao qual a viga resiste, o que confere com o esperado de aumentar a resistência com a diminuição do comprimento de onda.

Utilizando a tabela anterior também é possível analisar o comportamento do fator de



Figura 3.5 Vista lateral da viga com FLT.



Figura 3.6 Vista superior da viga com FLT.



Figura 3.7 Vista lateral da viga com a FLT acoplada com a flambagem local da alma.



Figura 3.8 Vista superior da viga com a FLT acoplada com a flambagem local da alma.



Figura 3.9 Gráfico do Fator de Carga com número de semi-ondas constante.

carga quando mantém-se constante o número de semi-ondas da viga utilizando a Figura 3.10. É possível verificar também que, analogamente, com o aumento da espessura da mesa tem-se uma maior resistência à FLT da viga, conforme esperado.



 ${\bf Figura~3.10} \ {\rm Gráfico~do~Fator~de~Carga~da~viga~com~o~valor~da~espessura~da~mesa~constante}.$

Capítulo 4

Comparação dos Resultados

Com o objetivo de comparar melhor os resultados encontrados de acordo com a norma adaptada e de acordo com os resultados da modelagem será necessário converter os valores de fator de carga encontrados no item anterior e utilizar o momento fletor crítico como base para a comparação.

Como o conceito de fator de carga refere-se ao carregamento equivalente na viga para que esta esteja submetida ao momento apresentado, será necessário converter os valores encontrados na modelagem para o valor equivalente de momento crítico para a flambagem lateral com torção.

A viga modelada foi considerada com um carregamento uniforme ao longo desta com o valor de 1×10^{-5} kN/cm e bi-apoiada. Com isto, é possível encontrar os valores de momento resistente equivalente de acordo com a Equação (4.1):

$$M = FC \times \frac{qL^2}{8}$$
$$= FC \times \frac{(1 \times 10^{-5}) \, 600^2}{8}$$
$$= 0,45 \times FC. \tag{4.1}$$

Utilizando os valores da Tabela 3.4 e os valores encontrados nas Tabelas 2.2 e 2.4 para o momento crítico de acordo com a norma e de acordo com a norma adaptada, respectivamente, é possível construir a Tabela 4.1 onde se apresentam os valores finais de momento para as três situações de análise.

Com a tabela encontrada já é possível verificar que os valores calculados de acordo com a NBR 8800 (2008) e a norma adaptada já são bem próximos e com os valores de norma

| $M_{rd} (\rm kN cm)$ | $t_f \ (mm)$ | | | | |
|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|
| n | 5 | 10 | 15 | 20 | |
| Norma | $1,\!194\!\times\!10^4$ | $2{,}318{\times}10^4$ | $3,\!445 \times 10^4$ | $4,575 \times 10^{4}$ | |
| Norma Adaptada | $1,\!579{\times}10^4$ | $3{,}187{\times}10^4$ | $4{,}799{\times}10^4$ | $6{,}417{\times}10^4$ | |
| 0 | $1,754 \times 10^{4}$ | $3{,}236{\times}10^4$ | $4{,}509{\times}10^4$ | $4{,}651{\times}10^4$ | |
| 10 | $2,\!251\!\times\!10^4$ | $3{,}505{\times}10^4$ | $5{,}322{\times}10^4$ | $5,\!870\!	imes\!10^4$ | |
| 20 | $2,\!275\!\times\!10^4$ | $4,\!176{\times}10^4$ | $7,\!181\!	imes\!10^4$ | $7{,}729{\times}10^4$ | |
| 30 | $2,\!606\!	imes\!10^4$ | $7,098 \times 10^{4}$ | $8,998 \times 10^{4}$ | $9,783{	imes}10^{5}$ | |
| 40 | $4,\!549\!	imes\!10^4$ | $9,\!377{	imes}10^4$ | $1{,}119{\times}10^5$ | $1{,}337{\times}10^5$ | |
| 60 | $4,\!598\!	imes\!10^4$ | $9,\!699\!	imes\!10^4$ | $1,566 \times 10^{5}$ | $1,662{	imes}10^{5}$ | |

Tabela 4.1 Valores de momento crítico encontrados de acordo com a NBR 8800, normaadaptada e de acordo com a modelagem.

adaptada maiores que de acordo com a NBR, o que confere com o esperado de que vigas com perfil de alma senoidal possuem uma maior resistência à flambagem lateral com torção.

Utilizando os valores da Tabela 4.1 é possível construir as Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 que apresentam os gráficos do momento resistente Mrd para a FLT de acordo com a NBR 8800 e os valores da norma adaptada e os valores encontrados na modelagem para uma análise comparativa dos seus resultados.

Observando-se as figuras apresentadas consegue-se perceber claramente o ganho de momento resistente com a viga de alma senoidal quando comparada com a viga de alma plana com mesmas dimensões e também o ganho de resistência com o aumento do número de semi-ondas.

Percebe-se também que os resultados da modelagem com n = 0 (equivalente à alma com perfil plano) possui valores bem próximos com aqueles calculados de acordo com a norma, o que permite verificar as hipóteses consideradas na modelagem da viga.



Figura 4.1 Momento resistente comparativo para $t_f = 5$ mm.



Figura 4.2 Momento resistente comparativo para $t_f = 10$ mm.



Figura 4.3 Momento resistente comparativo para $t_f = 15$ mm.



Figura 4.4 Momento resistente comparativo para $t_f = 20$ mm.

Capítulo 5

Conclusão

Os perfis de alma senoidal vem sendo empregados na construção civil há muito pouco tempo e a sua utilização ainda não é tão comum principalmente devido à falta de estudos no tema e falta de normas técnicas que suportem o dimensionamento corretos deste tipo de perfil, gerando uma certa insegurança nos projetistas que, por fim, utilizam soluções de engenharia mais correntes como perfis metálicos com grandes dimensões e enrijecedores ou estruturas em concreto.

Este projeto teve como objetivo comparar os métodos de cálculos propostos atualmente para os perfis de alma senoidal sujeitos à flambagem lateral com torção de vigas esbeltas, tanto de acordo com a NBR 8800 (2008) como pela norma adaptada por FAKURY *et al.* (2006) com os valores encontrados de acordo com a modelagem da viga utilizando o software de elementos finitos SolidWorks (2009).

Para uma comparação melhor dos resultados foram fixadas as condições de contorno da viga, o comprimento do vão livre, carregamento e dimensões do perfil com exceção da largura das mesas e do número de semi-ondas.

Com as condições da viga fixadas foi possível analisar comparativamente os resultados de momento crítico da viga, onde percebeu-se que o modelo de cálculo de acordo com a norma adaptada resulta em valores maiores do que a NBR 8800 (2008) para vigas de alma plana com mesmo perfil, o que confere com o resultado esperado de maiores resistências para perfis de alma senoidal.

Percebeu-se também que a modelagem da viga utilizando o SolidWorks com as características da viga parametrizadas resultou em valores de momento críticos condizentes com o esperado. Estes valores de momento cresciam tanto com o aumento da espessura da mesa quanto com o aumento do número de semi-ondas.

Quando comparados os momentos de cálculo de acordo com a NBR 8800 (2008) e norma adaptada com o momento de acordo com a modelagem foi possível perceber que os valores no segundo caso resultavam em dados mais completos, pois se considerava também o número de semi-ondas, o que não acontece com o procedimento de cálculo proposto para a norma adaptada.

Para aplicação prática de perfis com alma senoidal pode-se utilizar diretamente o modelo de elementos finitos para simular o comportamento da viga ou o procedimento de cálculo de acordo com a norma adaptada. O procedimento de cálculo de acordo com a norma adaptada obtém resultados mais conservadores de momento resistente, entretanto é possível obter valores mais precisos utilizando o modelo de elementos finitos. Com isto, convém considerar como modelo mais adequado o segundo caso por representar resultados a favor da economia e mais precisos.

Durante o levantamento de informações para a análise do projeto verificou-se a dificuldade de obtenção de dados e metodologias confiáveis de cálculo para vigas de alma senoidal, o que representaria uma dificuldade inicial bastante significativa para qualquer projetista.

Com as metodologias de cálculo definidas, verificou-se também uma dificuldade de obtenção de software em que fosse possível fornecer a equação parametrizada da curva da alma, sendo o problema solucionado pela utilização do SolidWorks (2009).

Como considerações para um futuro trabalho complementar vale considerar que neste projeto foram verificadas apenas a influência da alteração do número de semi-ondas e a dimensão da espessura da alma no cálculo do momento resistente e já foi possivel observar o aumento considerável na resistência da viga à flambagem lateral com torção. Sugere-se partir para novos estudos fazendo-se variar mais dimensões da viga e tecer conclusões a respeito do grau de influência no valor final de momento resistente para cada variação do perfil.

Outra sugestão de trabalho futuro seria a possibilidade de uma estruturação mais completa de métodos de cálculo para vigas com alma senoidal, principalmente porque atualmente o modelo sugerido não considera a influência do número de semi-ondas da viga e, como foi possível perceber, este valor possui uma relevância considerável no valor final do momento fletor resistente da viga.

| F | OLHA DE REGISTRO | DO DOCUMENTO | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ^{1.} CLASSIFICAÇÃO/TIPO | ^{2.} DATA | ^{3.} REGISTRO N° | ^{4.} N° DE PÁGINAS |
| TC | 25 de novembro de 2010 | DCTA/ITA/TC-149/2010 | 38 |
| ^{5.} TÍTULO E SUBTÍTULO: | | | |
| Otimização de Vigas com A | Alma Senoidal | | |
| ^{5.} AUTOR(ES): | | | |
| Luciana Ferreira Carvall 7. INSTITUICÃO(ÕES)/ÓRGÃ | 10 O(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES) | | |
| , <u> </u> | | | |
| Instituto Tecnológico de Activitation de Activitatio de Activitatio de Activitation de Activitation de Activit | eronáutica - ITA | | |
| (1) Viga; (2) Corrugada; (3 |) Senoidal | | |
| 9.PALAVRAS-CHAVE RESULT | CANTES DE INDEXAÇÃO: | | |
| Análise estrutural; Vigas | (suportes); Placas corrug | adas; Flambagem; Otimiz | zação; Carregamento; |
| Propriedades mecânicas; En ^{10.} APRESENTAÇÃO | ngenharia estrutural | X Nacional | Internacional |
| ITA São José dos Campos | Curso de Graduação em Eng | venharia Civil Aeronáutica | Orientador: Francisco |
| Alex Correira Monteiro. P | ublicado em 2010. | contaction and contac | orientador. I fanelseo |
| ^{11.} RESUMO: | | | |
| Zeman (empresa fabricante é comparado com o valor o o software de elementos fi brasileira, a norma adapta momento resistente com a o consideravam-se maiores q fornecia valores mais com resistente, o que não ocorre | e uropéia), que considera ape bitido pela NBR 8800 (2008) nitos SolidWorks. Quando ca ada e o modelo de element espessura da mesa e para os c uantidades de semi-ondas. Co pletos por considerar a qua no caso do cálculo de acordo | enas a resistência da mesa c e calculado também o mom omparados os resultados de cos finitos percebeu-se ser casos da modelagem um au oncluiu-se que o resultado d intidade de semi-ondas no o com a norma brasileira e a | omprimida. Este valor ento crítico utilizando acordo com a norma npre um aumento do nento também quando a modelagem também cálculo do momento norma adaptada. |
| ^{12.} GRAU DE SIGILO: | | | |
| (X) OSTENSIVO (|) RESERVADO | () CONFIDENCIAL | () SECRETO |