COMPARAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO DE VIGAS METÁLICAS BIAPOIADAS COM UMA E DUAS ALMAS SENOIDAIS UTILIZANDO O ANSYS

Augusto Bezerra Rosental Netto

Bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
augusto_rosental@hotmail.com

Ricardo Rodrigues de Araujo

Doutor em Estruturas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
araujo.r.r@gmail.com

RESUMO

Vibrações em estruturas geralmente são efeitos indesejados e que podem causar até o colapso total. Esses fenômenos ocorrem em estruturas de grande porte submetidas à excitações dinâmicas periódicas, como é o caso da ação das ondas em plataformas de petróleo ou da ação dos ventos em pontes. Tendo em vista a utilização crescente de perfis de alma corrugada nessas estruturas onde os esforços de flexão predominam sobre os demais esforços, faz-se necessário avaliar o comportamento de vigas com almas corrugadas mediante solicitações dinâmicas. Nesse contexto, desenvolve-se um estudo com o intuito de comparar as frequências naturais e os modos de vibração de perfis com uma e duas almas corrugadas senoidais avaliando diferentes configurações geométricas e seus possíveis ganhos de rigidez. Por fim, conclui-se que perfis com duas almas senoidais podem apresentar ganhos de rigidez variando-se apenas a distância entre as almas.

Palavras-chave: Vibrações. Dinâmica de Estruturas. Almas Senoidais. Frequências Naturais. Rigidez.

COMPARISON OF NATURAL FREQUENCIES AND VIBRATION MODES OF SIMPLY SUPPORTED STEEL BEAMS WITH ONE AND TWO SINUSOIDAL WEBS USING ANSYS

ABSTRACT

Vibrations are often undesired effects that occur in structures and can even cause total collapse. These actions happen to large structures under periodic dynamic excitation, such as the action of waves in oil rigs or the action of winds in bridges. Considering the increasing use of corrugated-web beams in these structures where bending stresses prevail over the other stresses, it is necessary to evaluate the behavior of corrugated-web beams under these dynamic loads. Hence, a study is developed with the purpose

of comparing the natural frequencies and vibration modes of sinusoidal corrugated-web beams using different geometric configurations and their possible increase in stiffness. Ultimately, it can be inferred that beams with two sinusoidal webs can have a significant increase in stiffness only by varying the distance between webs.

Keywords: Vibrations. Structural Dynamics. Sinusoidal Webs. Natural Frequencies. Stiffness.

1 INTRODUÇÃO

Vibrações em estruturas são fenômenos geralmente indesejados e ocorrem devido à atuação de ações dinâmicas periódicas, como as ondas em plataformas de petróleo e os ventos em pontes de grandes vãos. A utilização de perfis metálicos de alma corrugada nessas estruturas tem sido uma boa resposta às grandes solicitações de flexão, porém, ainda existem incertezas quanto ao comportamento destas vigas quando submetidas a efeitos dinâmicos que acarretem em vibrações. Nesse contexto, é desenvolvido um estudo comparativo entre os modos de vibração de perfis de aço com almas de corrugação senoidal e suas respectivas frequências naturais de vibração.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Frequências Naturais e Modos de Vibração

As frequências naturais de vibração de uma estrutura indicam a capacidade de oscilação livre após cessado o estímulo ou carga que gerou sua perturbação. Uma estrutura pode vibrar em diversas direções e de diversas formas, sendo que cada uma corresponderá ao seu respectivo modo de vibração. Para cada maneira de vibrar, a estrutura apresentará uma frequência natural de vibração, sendo que a mais importante nos estudos dinâmicos é a primeira, menor entre todas, denominada frequência fundamental (BOLINA, 2014).

Os elementos básicos que descrevem um movimento oscilatório, segundo Gallicchio (1999), são a massa, o amortecimento e a rigidez. Sabe-se que, segundo Balachandran (2009) e grande parte dos livros de dinâmica das estruturas, a frequência natural de vibração é expressa matematicamente pela Equação 1:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Onde:

k : rigidez da estrutura, medida em N/m no SI

m : massa da estrutura, medida em kg no SI

Percebe-se, então, que a frequência natural de vibração de uma estrutura estabelece uma relação diretamente proporcional à rigidez e uma relação inversamente proporcional à massa de uma determinada peça.

Outra forma de se obter a frequência natural de vibração de vigas simplesmente apoiadas submetidas a carregamentos uniformemente distribuídos, segundo Lasithan (2014), é expressa a seguir pela Equação 2:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (2)$$

Onde:

E : Módulo de Elasticidade

I : Momento de Inércia da viga

L : Comprimento da viga

Observa-se, através da Equação 2, que a frequência natural de uma estrutura também estabelece uma relação diretamente proporcional à inércia e inversamente proporcional a massa da peça. Além disso, verifica-se que o módulo de elasticidade do material e o comprimento da viga também influenciam nos valores da frequência natural.

2.2 Modelagem e Análise Computacional

Para a realização deste estudo foi utilizado o *software* de análises por Elementos Finitos Ansys versão de estudante 17.2, sendo utilizada a ferramenta *DesignModeler* para desenvolver a geometria e a ferramenta *MechanicalWorkbench* para se estabelecerem as condições de contorno. Foram desenvolvidos 16 modelos geométricos de vigas com almas senoidais, sendo um modelo com apenas uma alma (Figura 1), e os demais com duas almas (Figura 2), variando-se apenas o espaçamento “x” entre as almas, no intuito de verificar a colaboração da alma senoidal na rigidez à flexão da peça. Foram estabelecidas as condições de contorno como simplesmente apoiadas em ambas as extremidades da viga e também foi aplicada a força da gravidade para se obter resultados mais compatíveis com a realidade.

Figura 1 – Geometria do perfil com uma alma

Fonte: (Adaptado de NETTO, 2018)

Figura 2 – Geometria dos perfis com duas almas

Fonte: (Adaptado de NETTO, 2018)

Para a viga com apenas uma alma senoidal (modelo 1) foram atribuídas seguintes dimensões: comprimento da viga (L) = 5000 mm, largura das mesas (b_f) = 150 mm, altura da alma (h) = 593 mm, espessura das mesas (t_f) = 8,31 mm, espessura da alma (t_w) = 2,00 mm. Para as vigas com duas almas (modelos 2 a 16) foram atribuídas as mesmas dimensões do modelo 1, variando-se apenas a distância entre as almas (x). Nos modelos 2 a 13, variou-se essa distância em incrementos de 5,00 mm, iniciando em 5,00 mm no modelo 2 e terminando em 60,00 mm no modelo 13. A partir do modelo 13, variou-se

essa distância em incrementos de 10,00 mm, iniciando em 60,00 mm no modelo 13 e terminando em 90,00 mm no modelo 16. O aumento do incremento foi adotado pois não foram encontradas grandes variações nos resultados subsequentes. Em todos os modelos de vigas com duas almas senoidais, o ponto médio da distância entre as almas coincidiu com o ponto médio da largura da mesas.

As propriedades mecânicas utilizadas na composição dos modelos são apresentadas a seguir na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos perfis

Membros	F_y	F_u
Almas	300	410
Mesas	350	500

Fonte: (NETTO, 2018)

Onde:

F_y : Tensão de Escoamento, em MPa;

F_u : Tensão Última, em MPa.

Como há interesse futuro na realização de ensaios com corpos de prova para comprovar os resultados obtidos computacionalmente, a escolha das propriedades geométricas e mecânicas dos perfis foi baseada na disponibilidade oferecida pela única empresa nacional que fabrica estes tipos de perfis de aço: a Codeme Engenharia. A Figura 3 a seguir, ilustra as propriedades geométricas fabricadas pela empresa.

Figura 3 – Propriedades geométricas dos perfis de alma senoidal fabricados pela Codeme

Fonte: (Adaptado de CODEME ENGENHARIA, 2005)

- Altura da alma (h_s): 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200 mm;
 - Espessura da alma: 2,0 e 3,0;
 - Largura das mesas (b_f): 125 mm (mínimo), 350 mm (máximo);
 - Espessura das mesas (t_{fi} e t_{fs}): 4,75 mm (mínimo), 19 mm (máximo);
 - Comprimentos fornecidos: 4000 mm (mínimo), 16000 mm (máximo).
- Designação das vigas:

Os materiais utilizados na fabricação dos perfis corrugados da Codeme Engenharia são:

- Mesas: Aço USICIVIL 350 com tensão de escoamento (F_y) igual a 350 MPa e tensão última (F_u) igual a 500 MPa.
- Alma: Aço USICIVIL 300 com tensão de escoamento (F_y) igual a 300 MPa e tensão última (F_u) igual a 410 MPa.

Através das informações acima, é importante ressaltar que, nesses tipos de vigas, os esforços de flexão preponderam sobre os demais esforços. Por isso, em geral, as mesas dos perfis são compostas por aços mais resistentes, uma vez que absorvem a maior parte das tensões normais advindas da flexão.

Por fim, foram realizadas análises modais em todos os 16 modelos desenvolvidos, obtendo-se os 20 primeiros modos de vibração e suas respectivas frequências naturais para cada modelo estrutural.

Com os resultados obtidos foi possível realizar as seguintes comparações entre os modelos:

- Frequências fundamentais e o primeiro modo de vibração flexional na menor inércia
- Frequências naturais do primeiro modo de vibração flexional na maior inércia
- Frequências naturais do primeiro modo de vibração torsional

2.3 Comparação entre as frequências fundamentais e o primeiro modo de vibração flexional na menor inércia

A Tabela 2 mostra os resultados das frequências fundamentais de cada modelo desenvolvido, que coincidiu com o primeiro modo de vibração flexional na menor inércia da peça. Com os resultados obtidos, elaborou-se um gráfico relacionando o valor da frequência fundamental com o espaçamento entre as almas do perfil, conforme a Figura 4.

Com a leitura do gráfico observa-se que a frequência fundamental mais elevada foi encontrada no Modelo 4, no valor de 94,911 Hz, com um espaçamento de 15 mm entre almas. Através da Equação 1, que é utilizada para o cálculo da frequência natural de uma estrutura, observa-se que a relação rigidez-massa de perfis com duas almas aumentou gradativamente nos perfis com duas almas senoidais com espaçamentos entre 5 mm e 15 mm. No entanto, observa-se uma queda abrupta na frequência fundamental nos perfis com espaçamento de 20 mm, que se manteve praticamente constante nos modelos seguintes. Este fenômeno sugere que o ganho de rigidez da estrutura é bem superior ao ganho de massa ocasionado pelo acréscimo de mais uma alma senoidal nos perfis com espaçamento entre 5 mm a 15 mm. Já a partir de 20 mm, os valores de

frequência fundamental nos perfis de duas almas são menores em comparação com o valor do perfil com apenas uma alma, observando-se assim uma leve perda de rigidez à flexão.

Tabela 2 - Frequências fundamentais de cada modelo

Modelos	Nº de Almas	Espaçamento entre Almas (mm)	Frequência Natural Flexional no eixo de menor inércia (Hz)
Modelo 1	1	-	24,914
Modelo 2	2	5	57,880
Modelo 3	2	10	86,747
Modelo 4	2	15	94,911
Modelo 5	2	20	21,480
Modelo 6	2	25	21,525
Modelo 7	2	30	21,509
Modelo 8	2	35	21,520
Modelo 9	2	40	21,520
Modelo 10	2	45	21,590
Modelo 11	2	50	21,580
Modelo 12	2	55	21,610
Modelo 13	2	60	21,628
Modelo 14	2	70	21,702
Modelo 15	2	80	21,709
Modelo 16	2	90	19,964

Fonte: (Adaptado de NETTO, 2018)

Figura 4 - Gráfico que relaciona os valores de frequência fundamental e o espaçamento entre almas

Fonte: (NETTO, 2018)

Além disso, observa-se que, em todos os casos, a frequência fundamental coincidiu com a primeira frequência natural de vibração flexional no eixo de menor inércia. Tal fenômeno é compreendido analisando-se a Equação 2, que estabelece menores valores de frequência natural para valores mais baixos de momento de inércia da peça, ocasionando em um modo de vibração que causará flexão no eixo de menor inércia.

2.4 Comparação entre as frequências naturais do primeiro modo de vibração flexional na maior inércia

A Tabela 3 mostra os resultados de frequências naturais do primeiro modo de vibração flexional no eixo de maior inércia para cada modelo desenvolvido. A coluna “Modo Geral de Vibração” refere-se em que modo ocorre flexão na maior inércia.

Tabela 3 - Frequências naturais e modos de vibração flexionais no eixo de maior inércia

Modelos	Nº de Almas	Espaçamento entre Almas (mm)	Frequência Natural Flexional no eixo de maior inércia (Hz)	Modo Geral de Vibração
Modelo 1	1	-	118,12	Quinto
Modelo 2	2	5	147,86	Terceiro

Modelos	Nº de Almas	Espaçamento entre Almas (mm)	Frequência Natural Flexional no eixo de maior inércia (Hz)	Modo Geral de Vibração
Modelo 3	2	10	190,26	Terceiro
Modelo 4	2	15	135,05	Segundo
Modelo 5	2	20	118,63	Sexto
Modelo 6	2	25	119,19	Sexto
Modelo 7	2	30	119,21	Sexto
Modelo 8	2	35	119,23	Sexto
Modelo 9	2	40	119,27	Sexto
Modelo 10	2	45	119,29	Sexto
Modelo 11	2	50	119,31	Sexto
Modelo 12	2	55	119,32	Sexto
Modelo 13	2	60	119,33	Sexto
Modelo 14	2	70	119,34	Quinto
Modelo 15	2	80	119,25	Quinto
Modelo 16	2	90	118,00	Quinto

Fonte: (NETTO, 2018)

Através dos dados da Tabela 3, elaborou-se um gráfico relacionando o espaçamento entre as almas senoidais e a frequência natural dos modos de vibração flexionais na maior inércia, ilustrado na Figura 5.

Analisando a Tabela 3 e a Figura 5, constata-se que a maior frequência natural do primeiro modo de vibração flexional no eixo de maior inércia ocorreu no modelo 3, com espaçamento de 10 mm entre almas senoidais, e com o valor de 190,26 Hz. O gráfico se comporta de maneira semelhante à anterior, apresentando uma queda na frequência natural entre os perfis de 10 mm e 15 mm de espaçamento, sugerindo que há também uma perda de rigidez associada ao afastamento das almas a partir de uma distância superior a 10 mm.

Figura 5 - Gráfico relacionando as frequências naturais dos modos de vibração flexionais na maior inércia e o espaçamento entre almas senoidais

Fonte: (NETTO, 2018)

Outra constatação importante é a de que, a partir do espaçamento de 20 mm entre as almas senoidais, a frequência natural de flexão na maior inércia é praticamente igual a do perfil com uma única alma, sugerindo que o ganho de rigidez da peça é equivalente ao ganho de massa para este tipo de esforço.

2.5 Comparação entre as frequências naturais do primeiro modo de vibração torsional

A Tabela 4 mostra os resultados das frequências naturais obtidas no primeiro modo de vibração torsional para cada modelo desenvolvido. Através desta, elaborou-se o gráfico da Figura 6, que relaciona a frequência natural de vibração torsional com o espaçamento entre almas e ainda estabelece o limite da frequência natural de vibração de torção para perfis com apenas uma alma. A coluna “Modo Geral de Vibração” refere-se em que modo ocorre a torção.

Tabela 4 - Frequências naturais do primeiro modo de vibração torsional de cada modelo

Modelos	Nº de Almas	Espaçamento entre Almas (mm)	Frequência Natural Torsional (Hz)	Modo Geral de Vibração
Modelo 1	1	-	28,980	Segundo
Modelo 2	2	5	401,470	Oitavo
Modelo 3	2	10	582,290	Nono
Modelo 4	2	15	194,310	Quarto
Modelo 5	2	20	32,043	Segundo
Modelo 6	2	25	34,709	Segundo
Modelo 7	2	30	37,386	Segundo
Modelo 8	2	35	40,263	Segundo
Modelo 9	2	40	43,266	Segundo
Modelo 10	2	45	46,372	Segundo
Modelo 11	2	50	49,430	Segundo
Modelo 12	2	55	52,585	Segundo
Modelo 13	2	60	55,708	Segundo
Modelo 14	2	70	61,929	Terceiro
Modelo 15	2	80	67,905	Terceiro
Modelo 16	2	90	74,178	Terceiro

Fonte: (NETTO, 2018)

Figura 6 - Gráfico relacionando as frequências naturais de vibração torsionais e o espaçamento entre almas

Fonte: (NETTO, 2018)

Observando-se a Tabela 4, verifica-se que a frequência natural de vibração torsional mais elevada é de 582,29 Hz, ocorrendo no modelo 3 e correspondente ao nono modo geral de vibração da peça. Pela leitura do gráfico da Figura 6, mais uma vez observa-se o mesmo comportamento dos gráficos anteriores, corroborando as respostas de frequências naturais obtidas nos demais gráficos, e confirmando a elevada contribuição da alma na rigidez à flexão e à torção em perfis de alma dupla com espaçamentos não superiores a 15 mm.

Verifica-se também uma queda significativa nos valores de frequência natural entre os espaçamentos de 10 mm e 20 mm, sugerindo que exista uma elevada perda de rigidez à torção da estrutura ao se deslocar as almas a uma distância superior a 10 mm. Além disso, observa-se que, a partir de 20 mm de espaçamento entre almas, os valores de frequência natural aumentam gradativamente. Isto ocorre devido ao comportamento similar entre perfis com duas almas e perfis de seção fechada, que apresentam maior rigidez à torção quanto maior for a área interna à linha neutra da peça. Outro fato que aumenta a rigidez à torção destes perfis é a simetria axial nos diferentes planos de flexão, o que não ocorre usualmente em perfis de seção aberta.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo realizou comparações das frequências naturais de vibração entre os perfis de aço de uma e duas almas senoidais nos modos flexionais na menor inércia, flexionais na maior inércia e torsionais. Verificou-se também a influência do espaçamento entre as almas na relação rigidez-massa da peça, e foram constatados fenômenos dignos de estudos mais aprofundados.

Quanto às frequências fundamentais, em todos os perfis houve coincidência de valores com a frequência natural de vibração no primeiro modo flexional na menor inércia, devido à relação diretamente proporcional entre a inércia e os valores de frequência natural, relação esta que é expressa matematicamente pela Equação 2. Além disso, entre os espaçamentos de 5 mm a 15 mm, observou-se elevados valores de frequência natural, que apresentaram uma queda significativa entre 15 mm e 20 mm, e, por fim, dos 20 mm em diante, situaram-se abaixo da frequência fundamental do perfil com uma única alma.

Quanto ao modo de vibração flexional na maior inércia, o maior valor de frequência natural ocorreu no perfil de duas almas senoidais com espaçamento de 10

mm entre almas, indicando a melhor relação rigidez-massa da peça para este tipo de esforço. Além disso, para espaçamentos superiores a 15 mm, os perfis de duas almas apresentam praticamente a mesma frequência natural de vibração que o perfil com uma única alma, indicando que o ganho de rigidez é equivalente ao ganho de massa da peça nestas condições.

Verificou-se não somente a elevada rigidez à flexão, mas também a elevada rigidez à torção em perfis com duas almas senoidais, visto que elevados valores de frequência natural foram encontrados entre espaçamentos de 5 mm a 15 mm, sendo que o maior valor de frequência encontrado foi a um espaçamento de 10 mm. A partir dos 20 mm de espaçamento, observa-se um aumento gradativo e suave dos valores de frequência natural, indicando que o comportamento da peça à torção seja equivalente aos perfis de seção fechada. Em todos os modos de vibração comparados, verificou-se um fato intrigante e digno de estudos mais aprofundados: os gráficos desenvolvidos apresentaram a mesma tendência, com elevados valores de frequências naturais para espaçamentos entre 5 mm e 15 mm seguindo de queda abrupta quando atingido o espaçamento de 20 mm. Por fim, o desenvolvimento desta pesquisa colaborou na melhor compreensão do comportamento de vigas com almas senoidais no que tange as suas frequências naturais, e também no questionamento da relação entre a variação geométrica destes perfis e seus respectivos ganhos de rigidez à flexão e à torção.

REFERÊNCIAS

BALACHANDRAN, Balakumar; MAGRAB, Edward B. **Vibrações Mecânicas**. Tradução da 2. ed. americana, Austrália: Cengage Learning, 2009.

BOLINA, C.C.; Palechor, E. U. L.; Vásquez, M. P. R.; **Vibrações: As Frequências Naturais Estimada e Experimental de uma Estrutura**. In: Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria. São Paulo: Blucher, 2015.

CODEME ENGENHARIA S.A. **Perfis de alma senoidal: Critérios de projeto**. Versão 1.1, Brasil, 2005.

GALLICCHIO, Elisabeta D'Elia. **Sistemas Vibratórios: Um Enfoque através da Solução Dinâmica e da Matriz de Transferência**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(UFRGS). Porto Alegre, RS, 1999.

LASITHAN, L. G. **Mechanical Vibrations and Industrial Noise Control**. PHI Learning Pvt. Ed. 1, 2013.

NETTO, Augusto Bezerra Rosental. **Modelagem e comparação das frequências naturais e modos de vibração entre vigas metálicas biapoiadas com uma e duas almas senoidais utilizando o Ansys**. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). Rio de Janeiro, RJ, 2018.