

Análise de Deformação Dinâmica de Flexão de uma Viga de Alumínio a partir de Medidas de Aceleração

Jakerson Ricardo Gevinski, jakerson@fem.unicamp.br¹
Robson Pederiva, Robson@fem.unicamp.br²

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Rua Mendeleiev, 200. Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. Barão Geraldo – Campinas, SP – Caixa Postal 6122 – 13.083-970 Laboratório de Vibrações e Controle - DPM.

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Rua Mendeleiev, 200. Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. Barão Geraldo – Campinas, SP – Caixa Postal 6122 – 13.083-970

Resumo: O interesse de maior produtividade e baixos custos de manutenção, associados ao desenvolvimento de produtos mais otimizados, fizeram aumentar a preocupação com as falhas por fadiga em equipamentos. Neste contexto, o monitoramento da tensão dinâmica em estruturas e máquinas sujeitas à vibração adquire cada vez mais importância. Com este intuito, diversos métodos para a estimativa de tensões e deformações dinâmicas que utilizam parâmetros vibracionais vêm sendo desenvolvidos. Por estes métodos, basicamente, estima-se a deformação dinâmica pela derivação espacial do deslocamento obtido pelas técnicas de análise modal. Neste artigo será apresentada a avaliação experimental para a estimativa da deformação de flexão em um ponto da superfície de uma viga de alumínio. Pelo experimento, estimou-se a deformação a partir da análise da curvatura da viga, determinada pelas acelerações medidas em quatro pontos uniformemente distanciados do ponto de análise de deformação. A deformação estimada foi comparada com a deformação medida por um strain gage. Para o caso analisado, a comparação apresentou bons resultados.

Palavras-chave: Deformações dinâmicas, Viga, Flexão, Vibração

1. INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento industrial e a busca incessante de maior rentabilidade nos últimos anos têm criado a necessidade de aperfeiçoamentos nos processos produtivos e de manutenção. Neste aspecto, é indispensável que os órgãos responsáveis pela manutenção e produção das empresas busquem um perfeito equilíbrio entre maior produtividade e maior disponibilidade dos equipamentos associados a baixos custos. Com o intuito de colaborar com o equilíbrio entre produtividade e disponibilidade, a manutenção influencia a disponibilidade através das técnicas de manutenção corretiva, preventiva e preditiva, visando o diagnóstico precoce e o prognóstico de defeitos

Existem diversas técnicas voltadas ao diagnóstico de falhas e o prognóstico. A determinação do tempo de vida ou o tempo até a falha do equipamento é feita, por exemplo, através da extrapolação de valores de vibração, temperatura e pressão, medidos no equipamento. A análise de vibração é utilizada mais comumente para a monitoração prognóstica das máquinas, sendo esta realizada no domínio do tempo, no domínio da frequência, através de métodos estatísticos dentre outros.

Embora os valores de temperatura, vibração e pressão possam indicar o tempo até a falha do equipamento, pois os níveis de vibração ou temperatura podem aumentar devido ao surgimento de alguma falha na máquina, esses valores são extrapolados e comparados com valores aceitáveis ao tipo de equipamento. Esses sinais globais utilizados para a comparação podem não dar um alerta suficiente do dano iminente à máquina. Desta forma, a análise de tensão ou deformação dinâmica, que a estrutura estará sujeita, torna-se importante, pois pode ser um bom parâmetro para o diagnóstico de falhas em equipamentos.

As deformações dinâmicas, convencionalmente, são obtidas experimentalmente pelas técnicas de extensometria. Entretanto, quando é necessária a medição de deformação em muitos pontos da estrutura, esta técnica torna-se muito onerosa. Os transdutores utilizados na técnica de extensometria, por exemplo, strain gages, são caros, descartáveis e há a necessidade de limpeza da superfície analisada com a remoção da pintura e outros procedimentos padrões, o que pode exigir paradas dos equipamentos por longos períodos.

Neste sentido, com desenvolvimento das técnicas de análise modal e o conhecimento das relações entre deslocamentos e deformações da teoria da elasticidade, foram propostos diversos trabalhos e métodos que utilizam os

resultados da análise modal para prever ou estimar as deformações dinâmicas em estruturas. Esses métodos consistem basicamente na diferenciação espacial do deslocamento obtido pela análise modal e utilizam, na sua maioria, o método de diferenças finitas para a solução das equações diferenciais do problema de elasticidade.

No trabalho publicado em 1989, Bernasconi e Ewins mostraram como *strain gages* e transdutores de deslocamentos podem ser usados para a determinação dos modos de deformação normalizados pela massa. As Funções de Resposta em Frequência (FRF) de deslocamento e deformação são encontradas similarmente. Assim, os valores de deformação no domínio do tempo podem ser encontrados através da superposição modal da mesma forma que é possível se encontrar a resposta temporal do deslocamento. Koss e Karczub (1995) propuseram um método que diz respeito à deformação na flexão. A avaliação experimental utilizou apenas dois acelerômetros em uma viga de Euler-Bernoulli, e foi proposto um método unidimensional. Okubo e Yamaguchi (1995) previram a distribuição da deformação dinâmica sob condições de operação, usando a matriz de transformação deslocamento – deformação. Dovstam (1998) propôs o método da análise modal híbrida para complementar a análise modal convencional na determinação do deslocamento tridimensional da estrutura e com isso determinar o tensor de deformação. Em Karczub e Norton (1999) a flexão de uma viga Euler-Bernoulli é novamente estudada no tempo, e a abordagem foi baseada no método de diferenças finitas, com derivada de segunda ordem do deslocamento transversal da viga, ou seja, a análise da curvatura da mesma. As medições foram feitas em pontos equidistantes e simetricamente distribuídos ao redor do ponto de análise e a deformação não pôde ser prevista nas descontinuidades. Lee e Kim (1999) estudaram a deformação normal e de cisalhamento em uma placa com um núcleo viscoelástico. As deformações foram calculadas usando o método de diferenças finitas sobre modelos obtidos analiticamente da vibração de flexão da placa. Sehlstedt (1999), através dos valores de deslocamentos obtidos da análise modal híbrida, fez a análise do tensor de deformação dinâmica em uma placa utilizando o método de diferenças finitas e os modos próprios de vibração obtidos pelo método de elementos finitos. Lee (2007) propôs um método para a estimativa das respostas de deformação a partir das medições de deslocamentos utilizando a matriz de transformação, obtida através da matriz modal de deslocamento e de deformação.

Na maioria dos métodos propostos para estimação da deformação a partir de parâmetros modais é analisada a deformação dinâmica de flexão de vigas simples a partir da análise da curvatura da mesma. Desta forma, neste artigo serão apresentados o estudo da relação da deflexão e deformação em vigas Euler-Bernoulli e a avaliação experimental da deformação de flexão de uma viga de alumínio engastada em uma das extremidades utilizando medidas de aceleração.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nas últimas três décadas foram desenvolvidos diversos métodos de avaliação de deformação dinâmica a partir de parâmetros modais, no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Estes métodos consistem na utilização da derivação numérica por diferenças finitas do deslocamento obtido pela análise modal experimental ou pela análise modal operacional.

Na análise de deformação de vigas submetidas a esforços de flexão pura, a deformação normal específica longitudinal pode ser encontrada pela análise da curvatura da mesma. O estudo da relação deflexão – deformação para vigas Euler – Bernoulli será detalhado no item subsequente. Esta relação será utilizada posteriormente para a estimativa da deformação de flexão de uma viga de alumínio através de medidas de acelerações na direção transversal à superfície da mesma.

2.1. Relação entre a Deflexão e a Deformação em uma Viga

Para vigas submetidas à flexão pura, inicialmente retas, e com secção transversal constante ao longo do comprimento, a deformação específica normal longitudinal pode ser determinada pela análise da curvatura da mesma. Sendo x o eixo coincidente com o *eixo neutro* da secção e o eixo y o eixo de simetria de uma viga, conforme pode ser visto na Fig. (1), segundo Shigley et al (2005) pela hipótese de que as secções planas da viga permanecem planas durante a flexão e ao ser especificado: o raio de curvatura do eixo neutro como R ; o comprimento de um elemento diferencial desse eixo como ds e ângulo devido a curvatura como $d\theta$, então, a partir da definição de curvatura, tem-se:

$$\frac{1}{R} = \frac{d\theta}{ds} \quad (1)$$

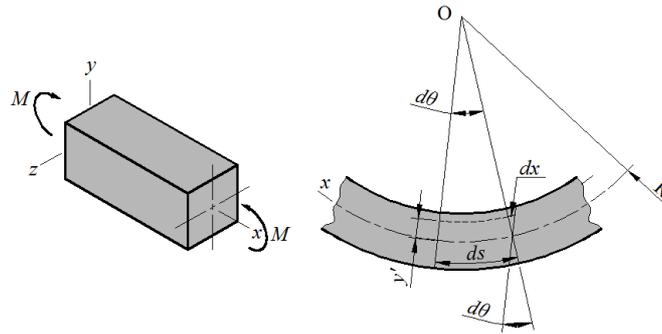


Figura 1. Viga reta em flexão positiva

Como ilustrado na Fig. (1), a elongação de uma “fibra”, a uma distância y' do eixo neutro é dx e pode ser definida por:

$$dx = -y' d\theta \quad (5)$$

Sendo a deformação normal ε_x definida como a elongação dividida pelo comprimento original, ou:

$$\varepsilon_x = \frac{dx}{ds} \quad (6)$$

Solucionando as Eq. (4), (5) e (6) simultaneamente tem-se:

$$\varepsilon_x = -\frac{y'}{R} \quad (7)$$

Desta forma, a deformação é proporcional à distância y' a partir do eixo neutro.

Para uma viga em balanço, engastada em uma das extremidades e na outra uma carga concentrada F , como pode ser visto na Fig. (2), pode ser encontrado o valor da deflexão (deslocamento na direção y) para qualquer ponto x da viga solucionando a seguinte equação diferencial:

$$EI \frac{d^4 y(x)}{dx^4} = w(x) \quad x \in [0, L] \quad (7)$$

onde:

- $w(x)$: refere-se há uma carga distribuída sobre a viga;
- E : Módulo de Elasticidade do material da viga;
- y : deslocamento vertical da viga;
- x : qualquer posição entre 0 e comprimento L da viga;
- I : Inércia da seção transversal da viga definida por:

$$I = \frac{be^3}{12} \quad (8)$$

onde b é a largura e e é a espessura da viga.

A deformação específica normal ε_x devido à flexão da viga pode ser determinada em função da deflexão y . Conhecendo a função que define a linha elástica da viga, Eq. (7), a deformação pode ser encontrada pela segunda derivada da função de deflexão relacionada com a distância y' , ou seja:

$$\varepsilon_x(x) = -y' \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \quad (9)$$

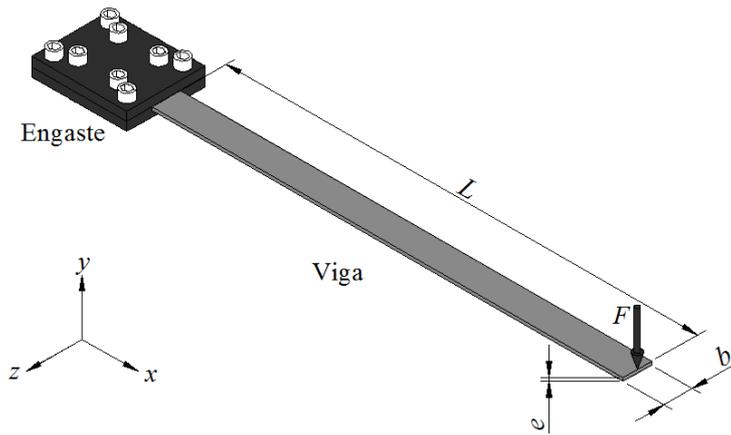


Figura 2. Viga reta balanço

Pela Eq. (9), a deformação ε_x pode ser encontrada para qualquer ponto x , desde que $0 \leq x \leq L$, se conheça a deflexão y deste ponto e a distância y' . Em algumas situações, a deflexão é conhecida apenas em alguns pontos ao longo do comprimento da viga. Desta forma, para a determinação da deformação pela Eq. (9) é necessário aplicar métodos numéricos para a solução da equação diferencial. Neste artigo, é proposta a utilização do método de diferenças finitas. Este método será apresentado no item abaixo.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste tópico será apresentado o Método de Diferenças Finitas (MDF) utilizado para a solução numérica da segunda derivada da Eq. (9) e uma avaliação numérica da deformação ε_x de diversos pontos da superfície de uma viga. Esse método será utilizado posteriormente na avaliação experimental realizada.

3.1. Método de Diferenças Finitas (MDF)

O Método de Diferenças Finitas (MDF) é uma das várias técnicas utilizadas para a diferenciação de uma função discreta. Segundo Mathews et al (1999) quando uma função pode ser avaliada em pontos equidistantes, posicionados à direita e à esquerda de um ponto x_0 , a aproximação da derivada da função pode ser feita pelo método de diferenças finitas centrais. A fórmula de diferenças finitas centrais de ordem $O(h^4)$, para a segunda derivada da função é dada por:

$$f''(x_0) \approx \frac{-f_2 + 16f_1 - 30f_0 + 16f_{-1} - f_{-2}}{12h^2} \quad (10)$$

onde f_i são os valores das funções dos pontos (nós) da malha de diferenças finitas e h a distância entre esses pontos.

Quando há a necessidade de se avaliar a derivada de uma função $f(x)$ em pontos anteriores ou posteriores a x_0 , onde é conhecido o valor da função $f(x)$, o método de diferenças finitas centrais não pode ser usado e sim, os métodos de diferenças finitas *Backward* e *Forward* (MATHEWS et al 1999).

A fórmula de diferenças finitas *Forward* de ordem $O(h^2)$ para a segunda derivada é dada por:

$$f''(x_0) \approx \frac{2f_0 - 5f_1 + 4f_2 - f_3}{h^2} \quad (11)$$

A fórmula de diferenças finitas *Backward* de ordem $O(h^2)$ para a segunda derivada é dada por:

$$f''(x_0) \approx \frac{2f_0 - 5f_{-1} + 4f_{-2} - f_{-3}}{h^2} \quad (12)$$

3.2. Avaliação Numérica da Deformação na Superfície de uma Viga

Neste tópico será feita uma avaliação da deformação na superfície da viga ilustrada na Fig. (2). Através da solução da equação que define a linha elástica da viga, mostrada na Fig. (2), é possível determinar a deflexão e a deformação em diversos pontos da mesma.

Segundo Shigley et al (2005) a equação analítica $y(x)$ que determina a deflexão da viga na direção y em função da coordenada x , de acordo com as condições apresentadas, é dada pela Eq. (13):

$$y(x) = -\frac{Fx^2}{6EI}(x-3L) \quad (13)$$

onde F é a força aplicada.

Considerando a largura da viga $b = 25,4\text{mm}$, a espessura $e = 3,05\text{mm}$, módulo de elasticidade $E = 74\text{GPa}$, $y' = 1,525\text{mm}$, comprimento $L = 420\text{mm}$ e a carga aplicada na extremidade da viga $F = 100\text{N}$, a deformação e a deflexão foram avaliadas em 11 pontos da viga distribuídos uniformemente ao longo do comprimento da mesma. Na Fig. (3) é mostrada a viga discretizada e em quais pontos é usado o método de diferenças finitas forward, backward e centrais na aproximação da deformação ϵ_x na superfície da viga.

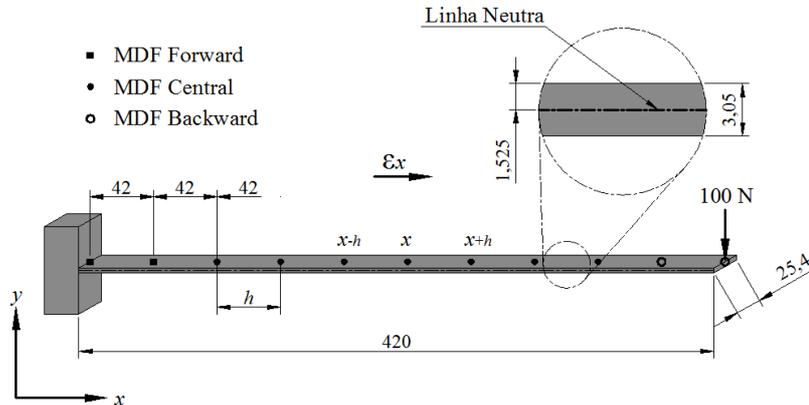


Figura 3. Viga discretizada para análise de deflexão e deformação

Pela Eq. (13) foi determinada a deflexão $y(x)$ para cada ponto da malha criada na viga. A deformação longitudinal analítica da viga em cada ponto da malha foi calculada através da Eq. (9). Os valores analíticos de deformação foram comparados com os valores encontrados através das fórmulas de diferenças finitas de segunda derivadas multiplicadas pela distância y' . Para a aproximação da deformação nos dois primeiros pontos foi utilizada a diferença finita forward, Eq. (11) para os dois últimos pontos foi utilizada a diferença finita backward, Eq. (12), e para os pontos centrais foi utilizado a diferença finita central, Eq. (10). A Tab. (2) mostra a comparação entre os valores de deformação ϵ_x da viga encontrado analiticamente e numericamente por diferenças finitas para alguns pontos da malha, e também o pequeno erro obtido na comparação.

Tabela 1. Comparação da deformação analítica e numérica da viga

nó	x (mm)	y(x) mm	ϵ_x Analítico	ϵ_x MDF	Erro 1.0e-016
1	0	0	0,0014	0,0014	0,020
3	84	-3,112	0,0012	0,0012	-0,020
5	168	-11,559	0,0009	0,0009	-0,098
7	252	-24,006	0,0006	0,0006	0,069
9	336	-39,122	0,0003	0,0003	-0,135
11	420	-55,570	0	0,0000	0,480

No próximo tópico será abordada a avaliação experimental da deformação dinâmica de flexão de uma viga medida por *strain gage* e estimada através de medidas de aceleração e utilizando o método de diferenças finitas.

4. PROCEDIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o intuito de prever experimentalmente a deformação utilizando medidas de aceleração foi realizada uma avaliação experimental em uma viga. A análise foi feita em uma viga de alumínio engastada em uma das extremidades. A viga avaliada possui dimensões iguais as apresentadas na seção 3.2. As deformações foram medidas e estimadas próximas a região de engaste.

Foram realizados dois tipos de experimento. O primeiro experimento foi realizado para estimar a Função de Resposta em Frequência de deformação para identificar faixas de frequências de maior amplitude de deformação. O segundo experimento foi realizado com o intuito de prever a deformação de flexão da viga utilizando valores de aceleração medidos simultaneamente em quatro pontos uniformemente espaçados em relação ao ponto de análise de deformação. O valor de deformação previsto foi comparado com o valor de deformação medido através de *strain gages*.

4.1. Primeiro Experimento: Estimação de FRF

As estimações da FRF de deformação de flexão da viga foram realizadas com o objetivo de se analisar as faixas de frequências de maior deformação de flexão e se identificar algumas frequências de interesse. Essas frequências foram usadas nas excitações harmônicas para a análise da deformação no domínio do tempo, realizadas no segundo experimento. A FRFs foram estimadas utilizando os estimadores $H1(\omega)$ e $H2(\omega)$, implementados em um programa em MATLAB® 7.3. Para a realização do experimento foi feita a montagem e a conexão de todos os equipamentos conforme o esquema ilustrado na Fig. (4).

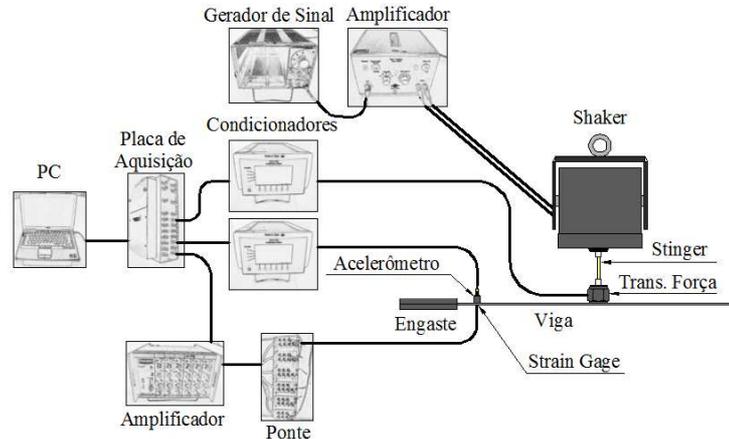


Figura 4. Esquema montagem experimental para estimar FRF

A viga analisada foi submetida a uma excitação aleatória, ruído branco, gerado pelo gerador de sinal aleatório. O ponto de excitação foi fixo a 210mm do engaste e o ponto de resposta de deformação, o ponto onde o *strain gage* foi colado, a 30mm do engaste da viga. O *strain gage* uniaxial utilizado no experimento foi da marca KYOWA® e comprimento 0,3mm.

A FRF de deformação estimada e a função de coerência encontrada estão demonstradas no gráfico da Fig. (7):

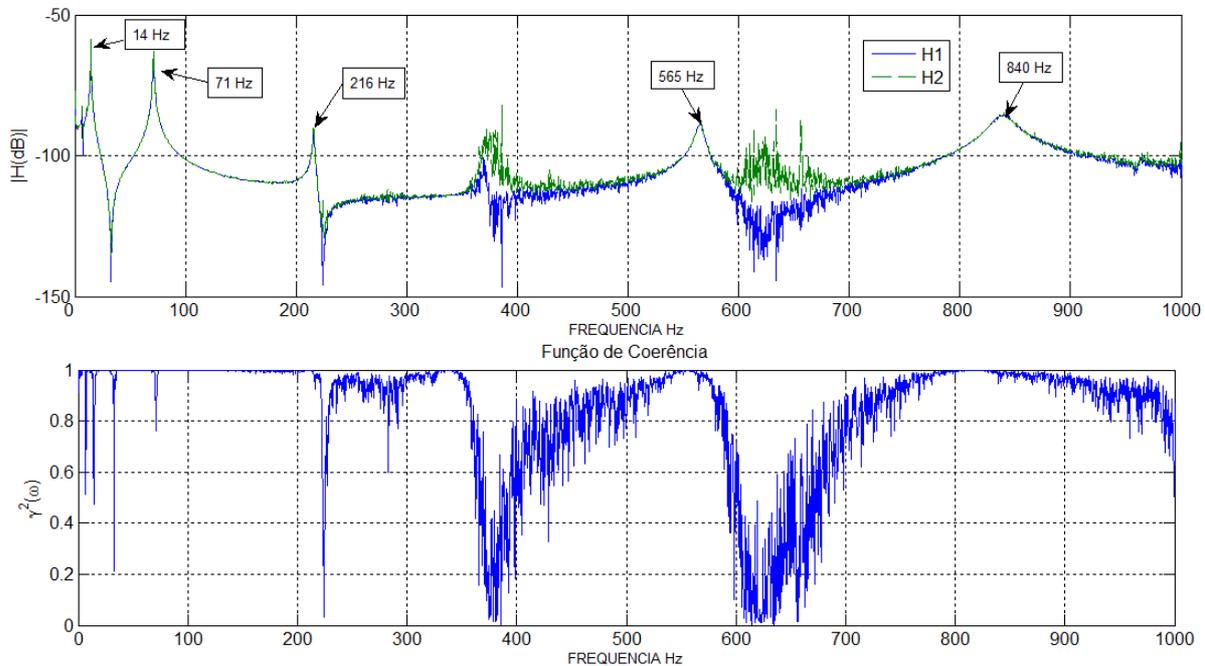


Figura 5. FRF de deformação e função de coerência estimadas experimentalmente

Pode-se verificar na Fig. (5) que tanto a FRF estimada quanto a função de coerência encontrada experimentalmente não são boas para frequências maiores que 220 Hz. Nas ressonâncias e antirressonâncias a coerência geralmente apresenta valores diferentes da unidade, principalmente devido à baixa relação sinal-ruído da força excitadora, no caso da ressonância, e a baixa relação sinal-ruído da resposta, no caso da antirressonância. Para as altas frequências, ou seja, maiores que 220 Hz, que não coincidem com as ressonâncias ou antirressonâncias, a coerência é ruim provavelmente

pela pequena amplitude do sinal de resposta (deformação). Estas observações influenciaram na escolha de faixas de frequências de análise menores que 220 Hz e próximas as frequências de 14 e 70 Hz, onde os valores de deformação são maiores e possíveis de serem medidos pelo *strain gage*, sem que haja a necessidade de grandes amplitudes da força excitadora.

4.2. Segundo Experimento: Análise Experimental da Deformação da Viga pelo MDF

A análise experimental da deformação da viga pelo MDF consiste em prever experimentalmente a deformação dinâmica de flexão na superfície da viga utilizando dados medidos de aceleração na direção perpendicular à superfície da viga, direção y , e o método de diferenças finitas, em frequências de excitações conhecidas. O ponto de análise, ou seja, o ponto onde foi prevista a deformação foi em um ponto distante 30mm do engaste da viga.

Como visto anteriormente, a deformação normal ε_x de uma viga submetida à flexão pode ser determinada através da análise da curvatura da mesma pela derivada de segunda ordem do deslocamento transversal ou deflexão. No experimento realizado, a deflexão foi obtida através das acelerações medidas e foi possível prever a deformação em um ponto de análise utilizando o método das diferenças finitas. A fórmula de diferença finita utilizada, para o experimento em questão, foi a fórmula de diferença finita central de ordem $O(h^4)$ para a segunda derivada, conforme Eq. (10). O uso desta fórmula implica no conhecimento de cinco valores da função a que se quer derivar, desta forma, foram colados 4 (quatro) acelerômetros na superfície superior da viga uniformemente espaçados. O quinto valor foi considerado nulo e se refere ao ponto (1) um ou o do engaste da viga. Esta simplificação foi necessária, pois o condicionador do sinal dos acelerômetros utilizado possui apenas quatro canais e optou-se pela medição simultânea das acelerações. A Fig. (7) ilustra o posicionamento dos acelerômetros na viga e a denominação dos pontos. Os acelerômetros utilizados foram acelerômetros piezoelétricos Delta Tron® tipo 4508 da marca Brüel e Kjaer.

A viga foi submetida a excitações harmônicas senoidais em diversas frequências ajustadas no gerador de sinal. Os dados foram adquiridos utilizando um programa de aquisição desenvolvido no MATLAB® 7.3. O tempo de aquisição de cada sinal foi de 9 segundos e frequência de amostragem $f_s = 2000\text{Hz}$. As frequências da força excitadora com que a viga foi submetida foram de aproximadamente de 30,11, 44,11 e 73,22Hz.

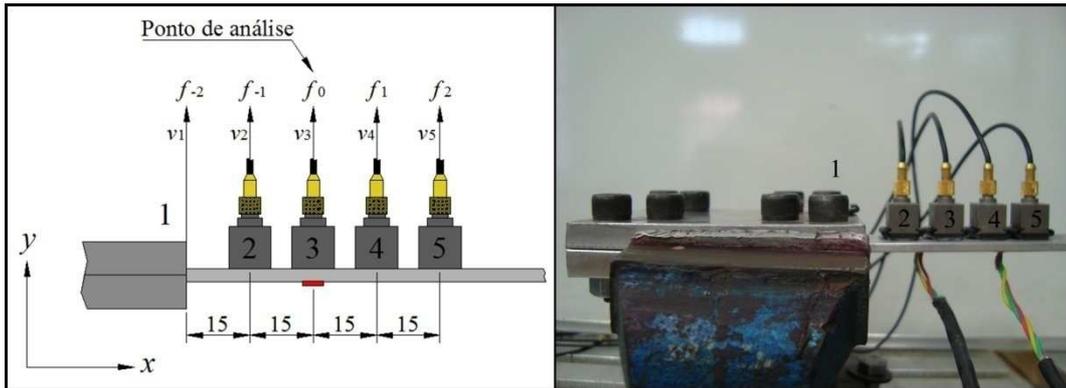


Figura 6. Posicionamento dos acelerômetros na viga

Os valores de acelerações foram transformados para valores de deslocamento dividindo-os por $-(2\pi f)^2$, sendo f a frequência de cada sinal analisado. Esse valor se refere ao termo $-\omega^2$ na relação entre deslocamentos e acelerações harmônicas. Os sinais de acelerações para baixas frequências, ou seja, 30,11 e 44,11Hz, apresentaram características não completamente senoidais, ou seja, os sinais apresentaram componentes de diferentes frequências, além da frequência da força excitadora. Essas componentes de frequência interferem na transformação de aceleração para deslocamento pela divisão por $-\omega^2$. Desta forma, os sinais de aceleração foram filtrados digitalmente por um filtro passa – banda através do programa LabVIEW® 8.6. As faixas de frequências adotadas para a filtragem do sinal foram entre 5 e 180Hz.

A fórmula de diferença finita central para segunda derivada e ordem $O(h^4)$ utilizada no experimento para a estimativa da deformação é dada por:

$$f''(v_3) = \frac{-v_5 + 16v_4 - 30v_3 + 16v_2}{12h^2} \quad (14)$$

Considerando a distância h o passo entre os acelerômetros, distância entre o centro de um acelerômetro até o centro do próximo acelerômetro, sendo 0,015m, conforme mostra a Fig. (7), y' a metade da espessura do perfil sendo $1,525 \cdot 10^{-3}\text{m}$ e utilizando a Eq. (15):

$$\varepsilon(v_3) = y' f''(v_3), \quad (15)$$

a deformação longitudinal na superfície superior da viga pôde ser prevista utilizando valores de aceleração medidas através de acelerômetros. Os valores de deformação foram medidos pelo *strain gage* no ponto de análise, entretanto na superfície inferior da viga.

A comparação dos valores de deformação medidos pelo *strain gage* e estimados através dos valores obtidos pelos acelerômetros pode ser observada nos gráficos das figuras abaixo. Como a deformação foi estimada para a superfície superior da viga e foi medida na superfície inferior da mesma, considerou-se que a distribuição de deformação ao longo da espessura da viga seja nula na linha neutra e máxima na superfície. Entretanto, uma superfície estará em compressão enquanto outra estará em tração durante a flexão da viga. Para comparação dos resultados, foi invertida a fase da deformação medida multiplicando-a por -1.

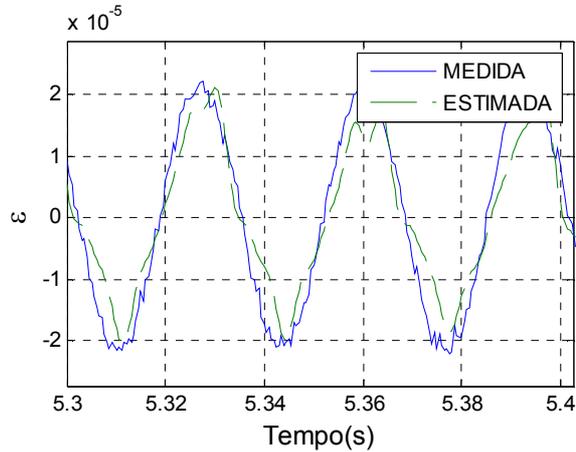


Figura 7. Comparação entre a deformação medida e estimada para 33,11 Hz

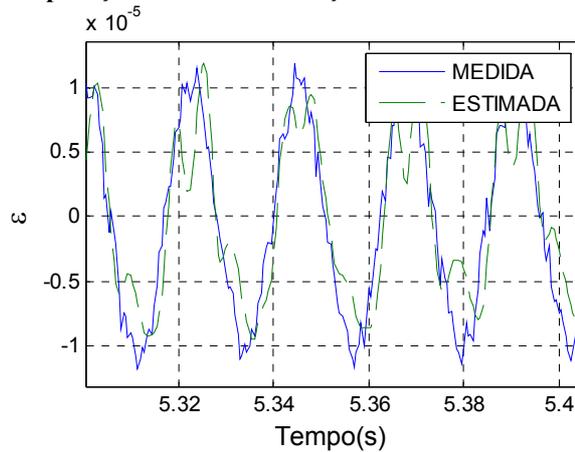


Figura 8. Comparação entre a deformação medida e estimada para 44,11 Hz

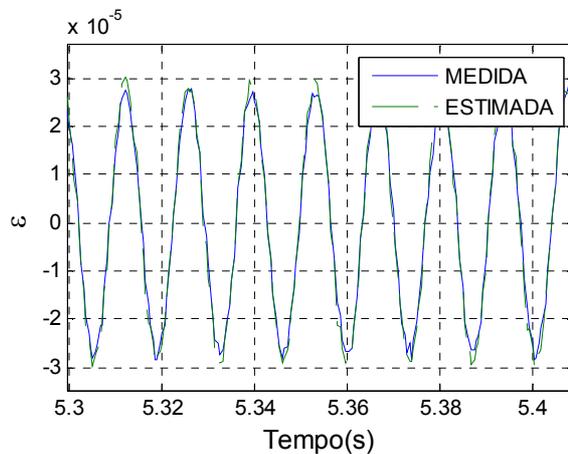


Figura 9. Comparação entre a deformação medida e estimada para 73,22 Hz

Pela observação das figuras acima é possível se perceber que a deformação estimada utilizando valores de aceleração aproximou-se da deformação medida pelo *strain gage*. Nas Fig. (7) e Fig. (8) os efeitos causados pela utilização da filtragem digital dos sinais de aceleração foram: uma pequena atenuação nos picos de amplitude e uma pequena defasagem no sinal de deformação estimada.

Quanto à distância entre os acelerômetros, a qual implica no erro de aproximação no uso do método numérico na derivação espacial, para o caso analisado, pode ser considerada o suficiente para uma boa aproximação do valor de deformação. Os acelerômetros possuem tamanho de 10mm, e caso houvesse a necessidade de uma melhor discretização, menor distância entre os pontos, outros transdutores deveriam ser utilizados. Para melhorar as características dos sinais de aceleração medidos em baixa frequência, poderiam ser utilizados acelerômetros de maior sensibilidade para essas frequências, no entanto, muitas vezes esses acelerômetros são maiores e poderiam interferir de modo considerável na discretização. A discretização está relacionada com o comprimento de onda. Quanto mais alta a frequência de análise menor deve ser essa distância. Uma vez que a propagação de ondas em uma estrutura é regida por uma função de duas variáveis (espaço e tempo), a discretização estrutural da malha deve ser feita de forma adequada para garantir que um fenômeno semelhante ao aliasing na discretização do domínio do tempo não aconteça. Na realidade, pode-se pensar nesse problema como uma espécie de “aliasing espacial”, no qual o espaçamento dos elementos não é suficiente para descrever o fenômeno ondulatório no espaço. Uma regra prática comumente usada é a de que devem existir, no mínimo, seis elementos por número de onda de maneira a discretizar a onda de forma adequada. Em aplicações práticas, o tamanho dos transdutores utilizados pode interferir na discretização. Em algumas situações, são utilizados nas medições vibrômetros a laser, capazes de medir a velocidade de vibração em pontos muito próximos.

5. CONCLUSÃO

A análise de deformação dinâmica explorada neste trabalho foi a análise de deformação de flexão dinâmica em vigas e pode ser feita a partir do conhecimento dos deslocamentos transversais da mesma. Foi realizada uma avaliação experimental da deformação dinâmica em uma viga de alumínio. Nas comparações entre a deformação medida e a deformação estimada pode-se observar boa compatibilidade das mesmas. Desta forma, estas técnicas que utilizam parâmetros modais para a estimativa das deformações dinâmicas mostram-se promissoras e abrem uma gama muito grande de problemas que necessitam ser estudados futuramente.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a todos do Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP que estiveram envolvidos com o trabalho e também a empresa SKF pela iniciativa e financiamento à pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Bernasconi, O.; Ewins, D. J., 1989, “Application of Strain Modal Testing to Real Structures”. In: International Modal Analysis Conference, Las Vegas. Proceedings. Bethel: Society for Experimental Mechanics, v.2, pp. 1453-1464.
- Dovstam, K., 1998, “Real modes of vibration and hybrid modal analysis”. Computational Mechanics. v. 21, p. 493-511.
- Karczub, D. G.; Norton, M. P., 1999, “Finite differencing methods for the measurement of dynamic bending strain”. Journal of Sound and Vibration, v. 226, (4). pp. 675-700.
- Koss, L. L.; Karczub, D., 1995, “Euler beam bending wave solution predictions of dynamic strain using frequency response functions”. Journal of Sound and Vibration, v. 184, (2). pp. 229-244.
- Lee, Byung-Chan; Kim, Kwang-Joon, 1999, “Shear and normal strain effects of core layers in vibration of square sandwich plates under clamped boundary conditions”. Journal of Sound and Vibration, v. 228, (4). pp. 845-856.
- Lee, Gun-Myung, 2007, “Prediction of strain responses from the measurements of displacement responses”. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 21. pp. 1143-1152.
- Mathews, John H.; Fink, Kurtis D., 1999, “Numerical Methods using Matlab”. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, cap 6, pp. 311-328.
- Okubo, N.; Yamagushi, K., 1995, “Prediction of dynamics strain distribution under operating condition by use of modal analysis”. In: International Modal Analysis Conference, Nashville. Proceeding. Bethel: Society for Experimental Mechanics, v.2, pp. 91-95.
- Sehlstedt, Niklas, 1999, “Hybrid strain analysis based on numerical differentiation”. Göteborg: Department of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Dissertação (Mestrado).
- Shigley, Joseph E.; Mischke, Charles R.; Budynas, Richard G., 2005, “Projeto de Engenharia Mecânica”. 7. ed. Porto Alegre: Bookman.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Dynamic Strain Analysis from Acceleration Measures in a Aluminum Beam

Jakerson Ricardo Gevinski, jakerson@fem.unicamp.br¹

Robson Pederiva, Robson@fem.unicamp.br²

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Rua Mendeleiev, 200. Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. Barão Geraldo – Campinas, SP – Caixa Postal 6122 – 13.083-970 Laboratório de Vibrações e Controle - DPM.

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Rua Mendeleiev, 200. Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. Barão Geraldo – Campinas, SP – Caixa Postal 6122 – 13.083-970

Resumo: The interest of greater productivity and low costs of maintenance, combined with the development of more optimized products, have raised concern about prevention of fatigue failure of equipments. In this context, the monitoring of the dynamic stress in structures and machines under vibration has become more important. With this purpose, several methods of estimation of dynamics stress and strain using vibrational parameters have been developed. Basically, results from modal analysis are transformed from the displacement space to the strain space by use spatial differential operator. This paper presents the experimental evaluation for the estimation of bending strain at a point on the surface of an aluminum beam. it was estimated the strain from the analysis of the curvature of the beam determined by the accelerations measured in four points evenly spaced.. The valued strain was compared with the measured strain by a strain gage. For the case examined, the comparison showed good results

Keywords: Dynamic strain, Beam, Bending, Vibration