

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA EM SUPERFÍCIES A PARTIR DA ACELERAÇÃO E MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO

Jakerson Ricardo Gevinski, jakersong@gmail.com

Robson Pederiva, robson@fem.unicamp.br¹

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 - DSI

Resumo: A avaliação das tensões e deformações em máquinas e equipamentos é convencionalmente realizada nas fases de projeto ou as deformações são monitoradas operacionalmente com auxílio das técnicas de medição por extensometria. Porém, essas medições nem sempre são possíveis. Adicionalmente, quando se trata da caracterização da distribuição da deformação ao longo da superfície de uma estrutura, ou seja, a medição da deformação de muitos pontos, a utilização de extensômetros se torna relativamente onerosa. Desta forma, a deformação dinâmica pode ser estimada a partir de dados de aceleração e a matriz de transformação. A matriz de transformação é obtida pela matriz modal de deslocamento e de deformação, as quais podem ser determinadas numericamente, e é utilizada para a transformação da aceleração em deformação. Neste artigo, o método da matriz de transformação e dados de aceleração serão utilizados para determinar a resposta temporal de deformação. As deformações estimadas foram comparadas com as deformações medidas com extensômetros. As deformações estimadas se aproximaram às deformações medidas. Além disso, o método mostrou-se robusto mesmo quando poucos pontos de aceleração foram utilizados na transformação.

Palavras-chave: Deformação, Aceleração, Matriz de Transformação

1. INTRODUÇÃO

As deformações dinâmicas, convencionalmente, são obtidas experimentalmente utilizando extensômetros. Entretanto, essas medições nem sempre são possíveis. Adicionalmente, quando se trata da caracterização da distribuição da deformação ao longo da superfície de uma estrutura, ou seja, a medição da deformação de muitos pontos, a utilização de extensômetros se torna relativamente onerosa. Os extensômetros precisam ser colados e não podem ser reutilizados ou movidos de ponto a ponto. Desta forma, diversos métodos foram desenvolvidos para a estimação da deformação dinâmica a partir de parâmetros modais, no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Estes métodos utilizam, na sua maioria, a derivação numérica do deslocamento obtido pela análise modal experimental ou pela análise modal operacional.

No trabalho publicado em 1989, Bernasconi e Ewins mostraram de que maneira extensômetros e transdutores de deslocamentos podem ser utilizados para a determinação dos modos de deformação normalizados pela massa. Koss e Karczub (1995) desenvolveram um procedimento para se estimar a deformação dinâmica em uma viga utilizando dois acelerômetros. Okubo e Yamaguchi (1995) estimaram a distribuição dinâmica de deformação em uma placa e, posteriormente, em um garfo frontal de bicicleta sujeita as condições de operação, utilizando a análise modal experimental e a matriz de transformação do deslocamento para a deformação. Essa matriz é composta pelos modos de deformação e deslocamentos. Em Karczub e Norton (1999), a flexão de uma viga é novamente estudada. A abordagem é baseada no método de diferenças finitas e na derivada de segunda ordem do deslocamento transversal da viga, ou seja, a análise da curvatura da viga. Lee (2007) propôs a estimação das respostas de deformação através de medições de deslocamentos e utiliza a matriz de transformação do deslocamento para a deformação. Lee constatou, a partir dos dados simulados, que o método pode ser aplicado na estimação da deformação em pontos não medidos da estrutura. Entretanto, é bastante sensível ao ruído, prejudicando a precisão. O truncamento da matriz modal, com um número de modos dentro da faixa de frequência analisada, não afetou o cálculo da deformação. Gevinski (2010) estudou a relação da deflexão e deformação em vigas e realizaram uma avaliação experimental da deformação de flexão de uma viga de alumínio, engastada em uma das extremidades, utilizando medidas de aceleração. O método é baseado na análise da curvatura e o método de diferenças finitas. Gevinski (2014) avaliou diversos métodos de determinação de deformação experimentalmente em placas de alumínio.

A partir do conhecimento dos métodos de estimação de deformação dinâmica, propõe-se neste artigo a utilização do método da matriz de transformação na análise de deformação em placas de alumínio. As deformações encontradas por este método foram comparadas com as deformações medidas. Os resultados foram satisfatórios.

2. MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO

A matriz de Transformação Deslocamento – Deformação ou conforme Okubo e Yamaguchi (1995), Displacement – Strain – Transformation matrix (DST), é utilizada para converter o deslocamento em deformação. Esta matriz de transformação pode ser obtida utilizando-se dos conceitos da transformação de coordenadas $q(t)$, apresentada na Eq. (1). Sendo o vetor de deformação $\varepsilon(t)$ representado pela diferenciação espacial da matriz modal de deslocamento da seguinte forma (Lee, 2007):

$$\begin{aligned}\{\varepsilon(t)\} &= \mathbf{D}([\Phi])\{q(t)\} \\ &= [\varepsilon]\{q(t)\}\end{aligned}\quad (1)$$

onde $\mathbf{D}$ representa o operador diferencial conforme o tensor de deformação, ou seja, representa as derivadas de primeira ordem, ou no caso da análise de deformação em vigas pelo deslocamento transversal, é um operador que representa a derivada de segunda ordem do vetor modal de deslocamento e $[\varepsilon]$ é a matriz modal de deformações cujas colunas representam as formas modais de deformação e $[\Phi]$ é a matriz modal de deslocamento. Rearranjando a Eq. (1) as coordenadas modais $q(t)$ são obtidas a partir de:

$$\{q(t)\} = [\Phi]^{-1}\{x(t)\} \quad (2)$$

Substituindo a Eq. (2) na Eq. (1) tem-se:

$$\{\varepsilon(t)\} = [\varepsilon][\Phi]^{-1}\{x(t)\} \quad (3)$$

Utilizando a seguinte notação:

$$[\mathbf{T}] = [\varepsilon][\Phi]^{-1} \quad (4)$$

onde $[\mathbf{T}]$ é a matriz DST. A Eq. (3) pode então ser reescrita como:

$$\{\varepsilon(t)\} = [\mathbf{T}]\{x(t)\} \quad (5)$$

Matricialmente a Equação acima é dada por:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1M} \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & T_{2M} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ T_{N1} & T_{N2} & \cdots & T_{NM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{Bmatrix} \quad (6)$$

onde N é o grau de liberdade associado e M refere-se ao número de modos de baixa ordem ou os M primeiros modos naturais de vibração.

A Eq. (4) mostra que a matriz de transformação é composta da matriz modal de deformação e a matriz modal de deslocamento. Essas matrizes podem ser obtidas: analiticamente; numericamente, por elementos finitos, por exemplo; ou experimentalmente, utilizando as técnicas de análise modal.

Em relação ao número de modos necessários para compor as matrizes modais, Lee (2007) concluiu que o truncamento dos modos acima ou afastados da banda de frequência de excitação não afeta na precisão da estimação da deformação. Assim sendo, o número de modos M está associado à frequência de análise. Em relação ao número de pontos de medição N , caso haja limitações experimentais de aquisição simultânea de muitas medições, então, uma matriz reduzida $[\Phi]$, quadrada e inversível, limitada ao número de medições deve ser considerado.

No entanto, Lee (2007) fez simulações utilizando a matriz de transformação. Sugeriu que a matriz modal de deslocamento $[\Phi]$ não necessita ser quadrada. Neste caso, a matriz modal de deslocamento inversa da Eq. (4) pode ser formalmente expressa pela matriz de deslocamento pseudo inversa expressa na Eq. (7).

$$[\Phi]^- = ([\Phi]^T [\Phi])^{-1} [\Phi] \quad (7)$$

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Diversos problemas em situações operacionais estão relacionados às rotações das máquinas e suas frequências naturais. Assim sendo, o conhecimento da amplitude de deformação, em frequências específicas ou no domínio do tempo, é muito importante para o diagnóstico e monitoramento da integridade estrutural do equipamento. Por este motivo, o método de estimação da matriz de transformação no domínio do tempo será avaliado experimentalmente nesta seção.

Uma placa retangular foi soldada em um bloco de alumínio de 0,500 X 0,100 X 0,100 m (x,y,z). No bloco de alumínio foi feito uma ranhura para encaixe da placa. A solda foi realizada com adição de material formando um filete de raio aproximadamente 5 mm. A placa utilizada é de alumínio e de formato retangular, cujas dimensões finais são 0,400 X 0,500 X 0,0095 m (x,y,z) e com um recorte retangular de 0,150 X 0,200 X 0,0095 m. A placa de alumínio e a malha de medição estão indicadas na Fig. 1.

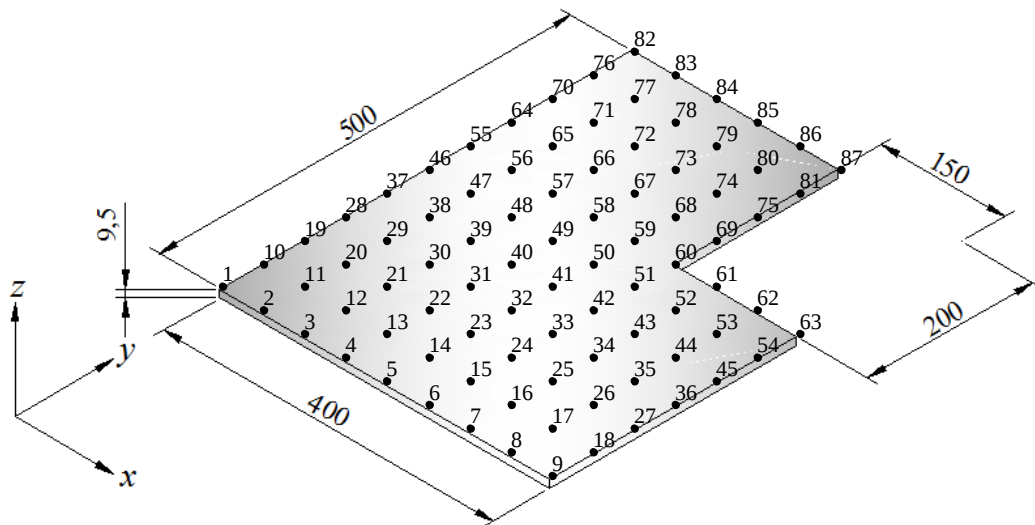


Figura 1. Placa com recorte e malha de medição

A placa foi submetida à excitação harmônica de amplitude de aproximadamente 10 N e frequência de 32 Hz. Esta frequência é próxima à primeira frequência natural da placa, a qual é aproximadamente 35,8 Hz, e também está relacionada à rotação da maioria dos motores elétricos, empregados em máquinas e equipamentos. A força de excitação foi aplicada à placa a partir de um excitador eletromagnético suspenso e gerada a partir de um gerador de sinal harmônico. A Fig. 2 ilustra as posições da excitação e referência. A Fig. 3 mostra a representação da força no domínio do tempo e da frequência.

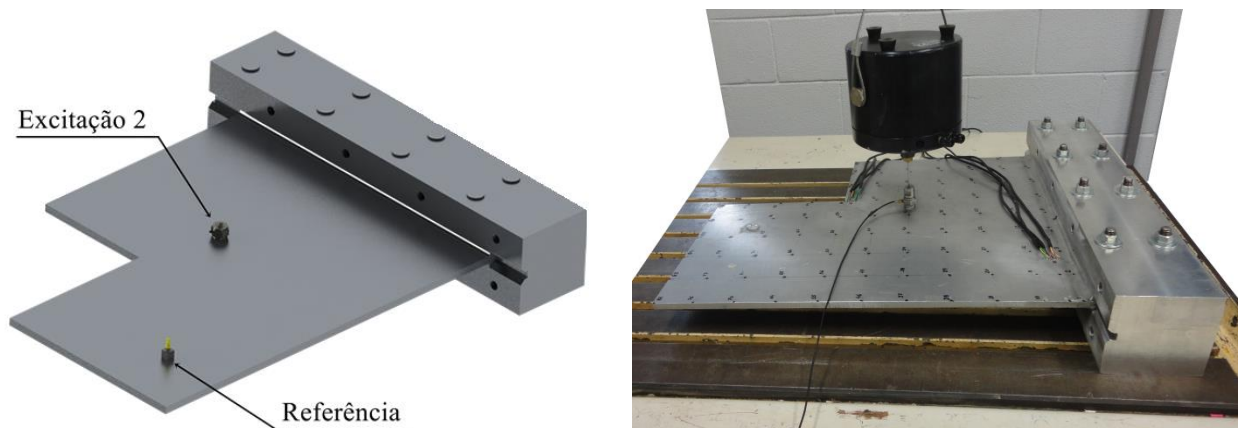


Figura 2. Posição da excitação harmônica e referência placa engastada

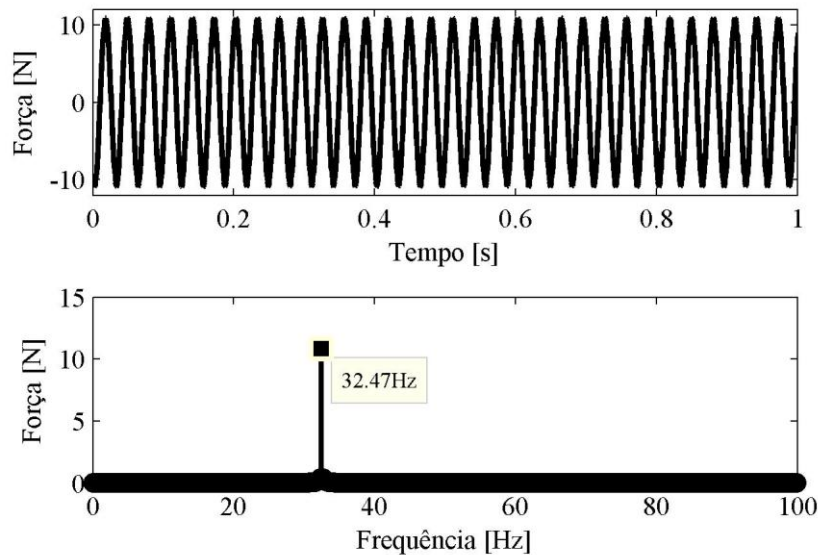


Figura 3. Força de excitação de amplitude 10 N e frequência 32,47 Hz aplicada na placa

As acelerações foram medidas nos 87 pontos de medição, conforme a malha de medição da Fig. 1, na direção perpendicular à superfície da placa, direção z . Utilizou-se um acelerômetro DeltaTron® tipo 4508 piezoelétrico de sensibilidade $10,06 \text{ mV/ms}^{-2}$, para as medições. Para o sinal de referência foi utilizado um acelerômetro de mesmo tipo e sensibilidade $9,96 \text{ mV/ms}^{-2}$. As medições foram realizadas ponto a ponto. As fases dos sinais foram corrigidas conhecendo-as a partir da densidade espectral cruzada entre os sinais medidos e o sinal de referência. Os sinais foram adquiridos com frequência de amostragem de 2000 Hz. As acelerações medidas foram convertidas para deslocamentos pela divisão por $-\omega^2$.

Considerando a resposta medida nos 87 pontos da malha de medição, a matriz modal $[\Phi]_{N_1 \times M}$ foi construída levando-se em conta somente as componentes de deslocamento modal ϕ_{jr} , obtidas na aproximação numérica em ANSYS®, na direção perpendicular à superfície da placa não deformada, direção z , com ϕ_{jr} $j=1,2, \dots, N_1$ e $r=1,2, \dots, M$. Sendo correspondente aos pontos de medição e $M=9$ o número de modos do truncamento da matriz modal. O número M escolhido se refere à frequência simulada para a placa de $f_M = 1034,6 \text{ Hz}$. Essa frequência é maior que a faixa de interesse, a qual foi escolhida como sendo 1000 Hz. Além disso, o 10º modo natural de frequência 1135,9 Hz é um modo planar de flexão em torno do eixo z . Neste modo os deslocamentos na direção z são nulos.

As matrizes de deformação $[\varepsilon_x]_{N_2 \times M}$, $[\varepsilon_y]_{N_2 \times M}$ e $[\varepsilon_{xy}]_{N_2 \times M}$ foram construídas convenientemente com as componentes de deformação modal $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ e γ_{xy} , respectivamente, e também obtidas na aproximação numérica em ANSYS®, para os 87 pontos de medição de aceleração e adicionalmente, para os pontos de validação, indicado na Fig. 4. O vetor de deslocamento $x(t)$ foi considerado como sendo os deslocamentos medidos no domínio do tempo. Com o vetor de deslocamento e as matrizes de transformação para cada componente de deformação, as mesmas foram determinadas pela Eq. (4).

As componentes de deformação estimadas foram comparadas com deformações medidas a partir de extensômetro tipo roseta modelo KFG-1-120-D17-11 em dois pontos de validação, conforme mostra a Fig. 4. Os pontos escolhidos são pontos onde há concentração de tensão devido ao entalhe e o engaste.

A Fig. 5 mostra as componentes de deformação ε_x , ε_y e γ_{xy} no domínio do tempo, estimadas pela matriz de transformação e medidas para o ponto de validação 1.

As deformações estimadas se aproximaram às deformações medidas. O erro na estimação da deformação ε_x foi de 19%. Considerando apenas 24 medições escolhidos aleatoriamente entre os 87 pontos de medição, os resultados foram os mesmos que considerando 87 medições. O erro na aproximação da amplitude de deformação ε_x se manteve em 19%.

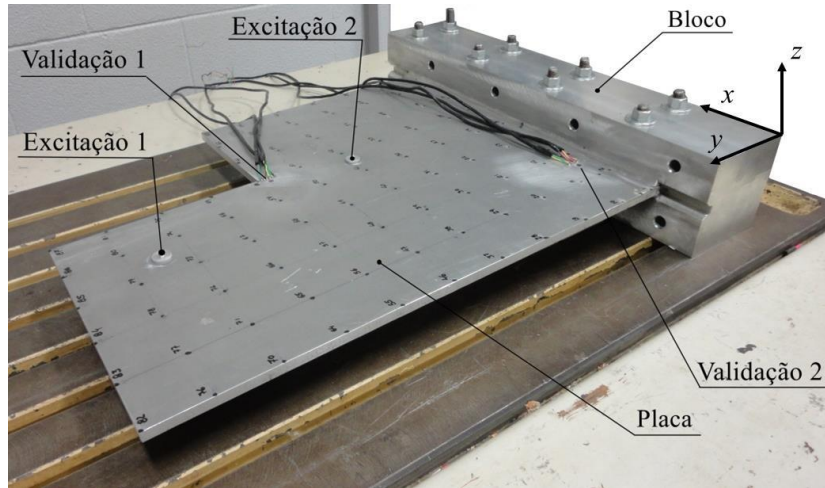


Figura 4. Força de excitação de amplitude 10 N e frequência 32,47 Hz aplicada na placa

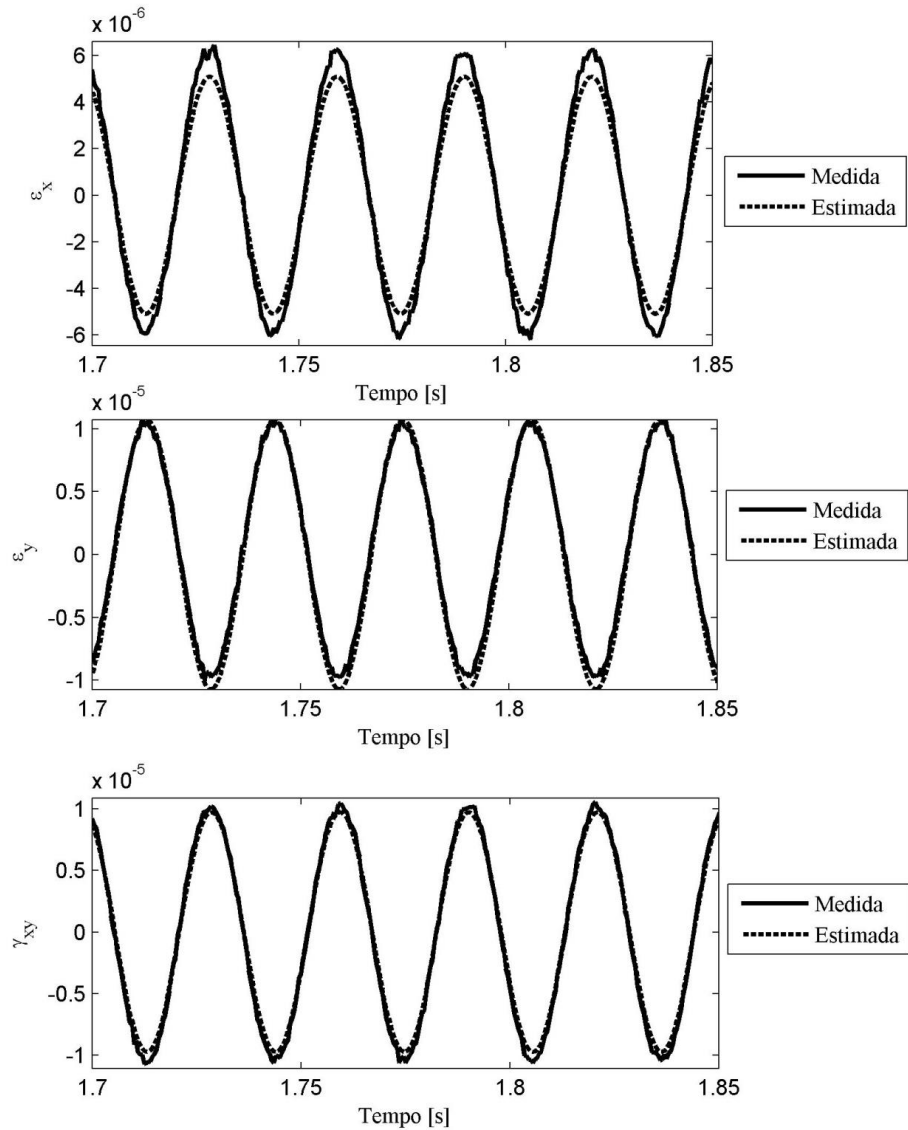


Figura 5. Componentes de deformação ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} no domínio do tempo – medidas e estimadas pela matriz de transformação - ponto de validação 1

As deformações estimadas se aproximaram às deformações medidas. No entanto, as deformações ϵ_x estimadas, apresentaram amplitude menor que a deformação medida. Esse erro de aproximação pode estar associado a diversos

fatores. Pode haver problemas na aproximação dos modos de deslocamento na direção x em elementos finitos ou erros de medição da deformação. Os erros de medição da deformação podem ser: fator de sensibilidade do extensômetro incorreto e problemas na colagem. Na utilização da malha de medições reduzida, apenas 24 pontos de medição, a matriz de transformação mostrou-se pouco sensível a alteração do número de medições. Os resultados também foram alcançados sem ajustes de propriedades e de condições de contorno na simulação por elementos finitos.

4. CONCLUSÃO

Neste artigo foi avaliada experimentalmente a estimação da deformação no domínio do tempo utilizando o método da matriz de transformação.

Foi possível se determinar a deformação a partir de medições de aceleração. Assim, é possível utilizar os resultados das análises convencionais de vibração para aprimorar o monitoramento de estruturas, haja vista que pela transformação do deslocamento medido em deformação, ter-se-á um parâmetro mais adequado para o diagnóstico e monitoramento da integridade estrutural dos sistemas mecânicos. As simulações numéricas utilizadas para a obtenção das matrizes modais não necessitam conter as reais propriedades do material envolvido, bem como, as condições de contorno não precisam ser ajustadas. Mesmo utilizando um número de medições de aceleração reduzido foi possível se obter bons resultados. Utilizando a matriz de transformação também foi possível se determinar a deformação em pontos onde a aceleração não foi medida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a todos da UNICAMP que estiveram envolvidos com o trabalho e também a empresa SKF pela iniciativa e financiamento à pesquisa.

6. 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.
- Gevinski, Jakerson Ricardo, *Análise de Tensão Dinâmica a partir de Parâmetros Modais*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- Gevinski, Jakerson Ricardo, *Determinação da Deformação Dinâmica em Superfícies utilizando Parâmetros Vibracionais*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- 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, Gun-Myung, 2007, "Prediction of strain responses from the measurements of displacement responses". *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 21. pp. 1143-1152.
- 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.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

DYNAMIC STRAIN ANALYSIS ON SURFACE USING ACCELERATION MEASUREMENTS AND TRANSFORMATION MATRIX

Jakerson Ricardo Gevinski, jakerson@fem.unicamp.br
Robson Pederiva, Robson@fem.unicamp.br

¹University of Campinas, Postal Code 6051, Campinas – SP, 13083-970, (Brazil).

Abstract. *The evaluation of stresses and strains in machinery and equipment is conventionally carried out during the project, or deformation are monitored operationally by measurement techniques. However, these measurements are not always possible. In addition, when is need the characterization of the strain distribution over the surface of a structure, that is, deformation measurement of many points, the use of strain gages becomes relatively expensive. Therefore, the dynamic strain can be estimated from acceleration data, and the transformation matrix. The transformation matrix is obtained by modal matrix displacement and strain which can be numerically determined, and is used for the transformation of acceleration to strain. In this paper, the method of transformation matrix and acceleration data will be used to determine the response time of strain. The estimated strain were compared with the strain measured by strain gages. Estimated strain approached the measures strain. Moreover, the method was robust even when a few points acceleration were used.*

Keywords: Strain, acceleration, transformation matrix.