



CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES VIBROACÚSTICAS DE ESTRUTURAS USANDO HOLOGRAFIA ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO

Nilton G. Colinas

José Maria C. Dos Santos

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Mecânica Computacional
Cx. P. 6122 - 13083-970 - Campinas, SP, Brasil

Resumo. *A holografia acústica de campo próximo tem se mostrado como uma forma atrativa de análise para problemas vibroacústicos. A holografia é um processo que permite determinar as características de um campo de ondas acústica usando a Transformada de Fourier Discreta, a partir de uma grade de pontos de medições regularmente espaçados obtidos em um ambiente acústico onde a Função de Green é conhecida. O presente trabalho apresenta uma breve revisão dos princípios desta técnica com uma aplicação na recuperação de propriedades vibroacústicas de estruturas. A fim de minimizar o problema de leakage oriundo do processamento dos sinais, a série de Fourier discreta regressiva foi utilizada como alternativa às técnicas de janelamento do sinal. Resultados obtidos para uma estrutura do tipo placa são analisados, validados e comparados com previsões teóricas.*

Palavras-chave: Holografia Acústica, Holografia Acústica de Campo Próximo, Vibroacústica, Vibrações Estruturais.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de medição experimental conhecido como holografia acústica de campo próximo (“Nearfield Acoustic Holography - NAH”), consiste em uma das aplicações práticas mais evidentes da holografia generalizada. Seu maior benefício reside no alto conteúdo da informação, isto é, o campo de pressão sonora medido em uma superfície bidimensional, o holograma, pode ser usado para reconstruir o campo de pressão sonora tridimensional, Maynard (1985). Contudo, tal benefício não se aplica apenas ao campo de pressão mas também ao campo de velocidades das partículas, intensidade acústica, etc. Outro grande benefício da técnica reside na sua baixa intrusividade no meio da medição. Tais benefícios propiciam a sua aplicação em diferentes áreas da engenharia em geral, com algumas explícitas vantagens na análise vibroacústica de estruturas.

A NAH é uma técnica que permite caracterizar as propriedades de um campo de ondas em um espaço tridimensional onde a Função de Green seja conhecida. Isto é obtido usando-se a Transformada de Fourier Discreta (TFD) de uma grade de pontos de medição do campo de ondas, regularmente espaçados, em um ambiente acústico. Limitações do número de pontos de medição e a presença de componentes de ondas evanescentes no campo próximo geram

problema de *leakage* no processamento dos sinais medidos, o qual introduz grandes erros sistemáticos nos resultados. Tais erros são, em geral, minimizados usando-se técnicas de janelamento do sinal, Kwon (1995).

Neste trabalho explora-se a utilização da NAH quando usada para caracterização de propriedades vibroacústicas de estruturas, com base nas medições do campo de pressão sonora irradiado pela própria estrutura quando sujeita a uma excitação externa. A série de Fourier discreta regressiva (“Regressive Discret Fourier Series – RDFS”) , Arruda (1992), minimiza o efeito do *leakage* e permite medidas com espaçamento irregular. Sua implementação na NAH mostrou-se vantajosa quando comparada às técnicas de janelamento do sinal na solução de problemas de imprecisão nas bordas da abertura da janela. Reconstruções holográficas dos campos de pressão, velocidade da partícula e intensidade acústica foram obtidas no plano fonte e em outros planos paralelos ao plano de medição (holograma). As reconstruções são comparadas com os correspondentes hologramas e com previsões teóricas obtidas no código computacional Sysnoise (1993).

2. HOLOGRAFIA ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO

O conceito da holografia generalizada é equivalente a usar uma condição de contorno de Dirichlet sobre uma superfície para a qual a Função de Green é conhecida, Morse (1953). Assim, o processo de reconstrução holográfica é um produto de convolução dos valores medidos no contorno com a Função de Green.

Considere que uma fonte está gerando um campo acústico o qual dentro de uma região do espaço tridimensional satisfaz a equação homogênea da onda (Equação de Helmholtz):

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

onde ψ representa o campo acústico, c representa a velocidade do som e t o tempo. Adicionalmente, considere que: a) Existe uma superfície S dentro do espaço 3D de interesse onde existe uma Função de Green, $G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_s)$, que satisfaz a equação homogênea de Helmholtz para \mathbf{r} dentro de S e termina em $\mathbf{r} = \mathbf{r}_s$ sobre S . b) Existe uma superfície H (superfície do holograma) a qual é paralela ou coincide com S para a qual $\psi(\mathbf{r}_H, t)$ pode ser medido para todo \mathbf{r}_H sobre H .

Aplicando a Transformada de Fourier na Eq.(1), obtém-se

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{r}, \omega) + k^2 \Psi(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (2)$$

onde $k = \omega/c$ é o número de onda, \mathbf{r} é o vetor posição e ω representa a frequência de interesse. Considerando um valor fixo para ω , tem-se um número de onda fixo e um comprimento de onda característico $\lambda = 2\pi c/\omega$, logo a Eq.(2) pode ser escrita como

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{r}) + k^2 \Psi(\mathbf{r}) = 0 \quad (3)$$

Desta forma, a solução da Eq.(3) pode ser determinada pela *Integral de Rayleigh*

$$\Psi(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \iint \Psi(\mathbf{r}_s) \frac{\partial G(\mathbf{r} | \mathbf{r}_s)}{\partial \mathbf{r}_s} d^2 r_s \quad (4)$$

Hologramas são usualmente registrados sobre superfícies planas. Embora outras formas de superfícies possam ser usadas, o processamento do holograma plano é o mais fácil de ser obtido e suas equações básicas constituem os algoritmos da holografia acústica de campo próximo. Na holografia plana, utiliza-se o sistema de coordenadas cartesianas x, y, z onde a superfície S é definida em $z = z_S$ e a superfície do holograma em $z = z_H$. A Função de Green requerida pela Eq. (3) satisfazendo a condição de contorno homogênea de Dirichlet em z_S é dada por:

$$G(x, y, z | x', y', z') = \frac{e^{ikA}}{A} - \frac{e^{ikB}}{B} \quad (5)$$

onde $A = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ e $B = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z'-2z_S)^2}$. A derivada normal $(\partial/\partial z')$ em $z' = z_S$ é dada por:

$$-4\pi G'(x-x', y-y', z-z_S) \equiv \frac{\partial G}{\partial n}(x, y, z | x', y', z_S) = -2 \frac{\partial e^{ikC}}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=(z-z_S)} \quad (6)$$

onde $C = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + \alpha^2}$. Portanto, a Eq.(4) torna-se:

$$\Psi(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x', y', z_S) G'(x-x', y-y', z-z_S) dx' dy' \quad (7)$$

ou escrevendo para $z = z_H$,

$$\Psi(x, y, z_H) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x', y', z_S) G'(x-x', y-y', z_H - z_S) dx' dy' \quad (8)$$

Como $z_H - z_S$ é constante, a Eq. (8) é uma convolução bidimensional, que é mais facilmente obtida usando-se a Transformada de Fourier Bidimensional. Para uma função $f(x, y)$ esta pode ser expressa como

$$\tilde{f}(k_x, k_y) = F[f(x, y)] = \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (9)$$

onde $F[]$ indica Transformada de Fourier e $F^{-1}[]$, a transformada inversa. Do teorema da convolução pode-se escrever a Eq. (7) como:

$$\Psi(x, y, z) = F^{-1}[\tilde{\Psi}(k_x, k_y, z_S) \tilde{G}'(k_x, k_y, z - z_S)] \quad (10)$$

e a Eq. (8) pode ser reescrita como:

$$\tilde{\Psi}(k_x, k_y, z_H) = \tilde{\Psi}(k_x, k_y, z_S) \tilde{G}'(k_x, k_y, z_H - z_S) \quad (11)$$

Escrevendo a Eq. (11) em termos de $\tilde{\Psi}(k_x, k_y, z_S)$ e substituindo na Eq. (10), tem-se

$$\Psi(x, y, z) = F^{-1} \left[\tilde{\Psi}(k_x, k_y, z_H) \left(\frac{\tilde{G}'(k_x, k_y, z - z_S)}{\tilde{G}'(k_x, k_y, z_H - z_S)} \right) \right] \quad (12)$$

A Equação (12) é a expressão que fornece a reconstrução holográfica do campo tridimensional $\Psi(x, y, z)$ em termos dos dados do holograma $\Psi(x, y, z_H)$. Aplicando a Transformada de Fourier na Eq. (5), tem-se

$$\tilde{G}'(k_x, k_y, z) = \begin{cases} \exp[iz(k^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2}] & , \quad k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \\ \exp[-z(k_x^2 + k_y^2 - k^2)^{1/2}] & , \quad k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (13)$$

O círculo $k_x^2 + k_y^2 = k^2$ é referido como círculo de radiação. Para pontos (k_x, k_y) dentro do círculo de radiação, \tilde{G}' , representa a variação de fase na direção z das ondas planas propagantes enquanto para pontos (k_x, k_y) fora do círculo de radiação, \tilde{G}' , representa o decaimento exponencial das ondas evanescentes.

3. SÉRIE DE FOURIER DISCRETA REGRESSIVA

A forma usual de reduzir *leakage* é o janelamento do sinal. Contudo esta técnica não é adequada no caso de dados finitos no domínio espacial. A técnica RDFS consiste em representar os dados por uma série de Fourier discreta regressiva. Diferente da TFD, na RDFS o comprimento original do vetor de dados não é assumido como sendo igual ao período do sinal e o número de linhas de frequência também não é assumido como sendo igual ao número de pontos dos dados.

Considerando um modelo da RDFS bidimensional, igualmente espaçado, o campo de pressão acústica Ψ_{mn} (por simplicidade, é omitida a dependência da frequência) é expresso como:

$$\Psi_{mn} = \sum_{j=-p}^p \sum_{l=-q}^q Z_{jl} W_M^{mj} W_N^{ln} + \varepsilon_{mn}, \quad \begin{cases} m = 0, \dots, M-1; \\ n = 0, \dots, N-1 \end{cases} \quad (14)$$

onde Ψ_{mn} representa os dados discretizados com resoluções espaciais constantes Δx e Δy , $W_M = \exp(i2\pi / M)$, $W_N = \exp(i2\pi / N)$ e ε_{mn} representa o ruído contido em Ψ_{mn} . O comprimento do vetor de dados em x é $M\Delta x$, mas o período do RDFS é $M\Delta x > M\Delta x$ onde $M \neq M$ e $N \neq N$. Uma redução nos dados é alcançada porque $p \ll M$ devido ao baixo número de ondas do campo acústico medido. Na direção y , $N\Delta y > N\Delta y$ e $q \ll N$. Os dados $M \times N$ em Ψ são representados por uma matriz complexa Z de elementos Z_{jl} com tamanho $(2p+1) \times (2q+1)$. A RDFS é uma aproximação e não uma interpolação de Ψ_{mn} . Portanto, os coeficientes de Euler-Fourier não podem ser calculados pela TFD. Rescrevendo a Eq.(14) na forma matricial:

$$\Psi = W_M Z W_N + \varepsilon \quad (15)$$

A solução por mínimos quadrados é dada por:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{W}_M^* \mathbf{W}_M)^{-1} \mathbf{W}_M^* \boldsymbol{\Psi} \mathbf{W}_N^* (\mathbf{W}_N \mathbf{W}_N^*)^{-1} \quad (16)$$

onde as matrizes a serem invertidas são relativamente pequenas, $(2p+1) \times (2p+1)$ e $(2q+1) \times (2q+1)$, respectivamente. O campo de pressão acústica livre do ruído $\boldsymbol{\varepsilon}$ é obtido com

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{W}_M \mathbf{Z} \mathbf{W}_N^* \quad (17)$$

onde \mathbf{W}_M e \mathbf{W}_N podem ser calculados para a resolução espacial desejada. A redução dos dados é alcançada porque \mathbf{Z} representa os dados usando apenas $(2p+1) \times (2q+1)$ valores em lugar dos MN valores originais.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O desempenho da NAH na reconstrução do campo de ondas na fonte e em outros planos paralelos ao plano do holograma, foi avaliado através de um experimento usando como fonte uma placa retangular excitada com uma força aleatória. O arranjo da montagem experimental está mostrado na Figura 1.

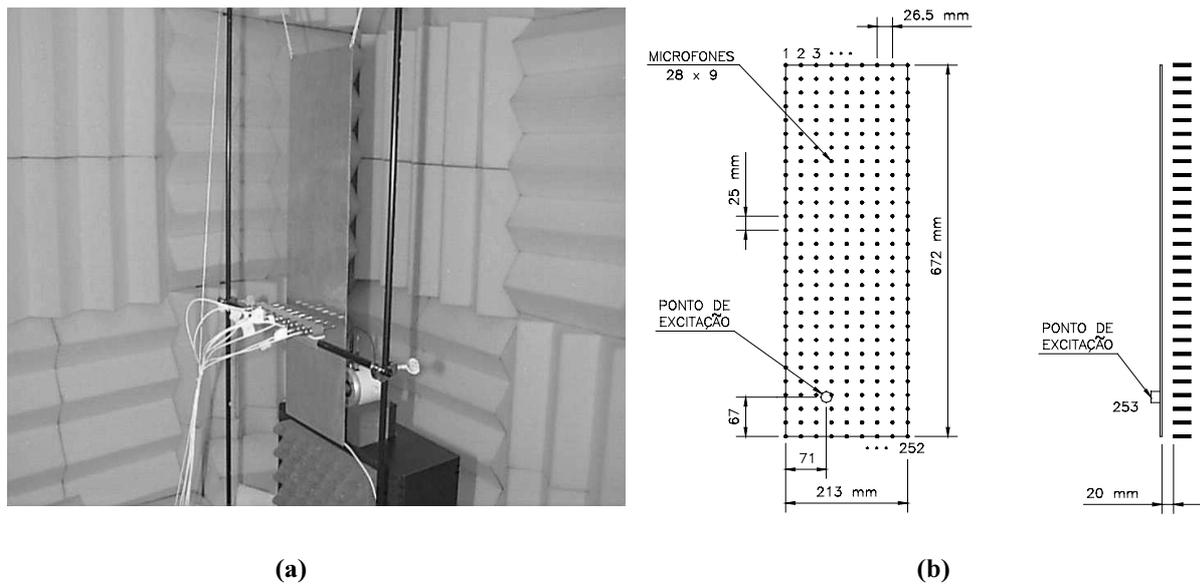


Figura 1 –Montagem do experimento: (a) vista geral, (b) posicionamento dos transdutores.

O campo de pressão acústica foi medido sobre uma grade com as mesmas dimensões da placa (213 x 672 mm) com espaçamento de 26.5 mm na horizontal, 25 mm na vertical e distante 20 mm da placa (Figura 1b). Usando o sinal do transdutor de força (PCB 208A02) da excitação como referência e nove microfones (TMS 130A10) para a medição do campo de pressão acústica, realizou-se uma varredura deslocando verticalmente a cada 25mm uma viga horizontal contendo os 9 microfones igualmente espaçados de 26.5 mm. O material da placa é alumínio, e, para os cálculos teóricos, foram utilizados valores tabelados com módulo de elasticidade de 71.7 GPa, módulo de rigidez de 26.8 GPa e densidade de 2.8 Mg/m³.

Para cada ponto da grade de medição obteve-se a correspondente função de resposta em frequência (FRF) sobre uma faixa de frequência de DC-400 Hz. Com base no campo de pressão acústica medido foi possível, para cada frequência natural da placa identificada, reconstruir na face da placa e, em planos paralelos ao holograma, os campos de pressão

acústica, velocidade da partícula e intensidade acústica. Para a primeira frequência natural (37.41 Hz) da placa, as Figuras 2a e 2b mostram a reconstrução no plano fonte dos campos de pressão e velocidade da partícula (vistas 3D e plantas), enquanto a Figura 2c mostra o mapa vetorial de intensidade. Na Figura 3 apresentam-se as mesmas variáveis da Figura 2 agora reconstruídas em um plano a 10mm da fonte para a terceira frequência natural (105.31 Hz) da placa.

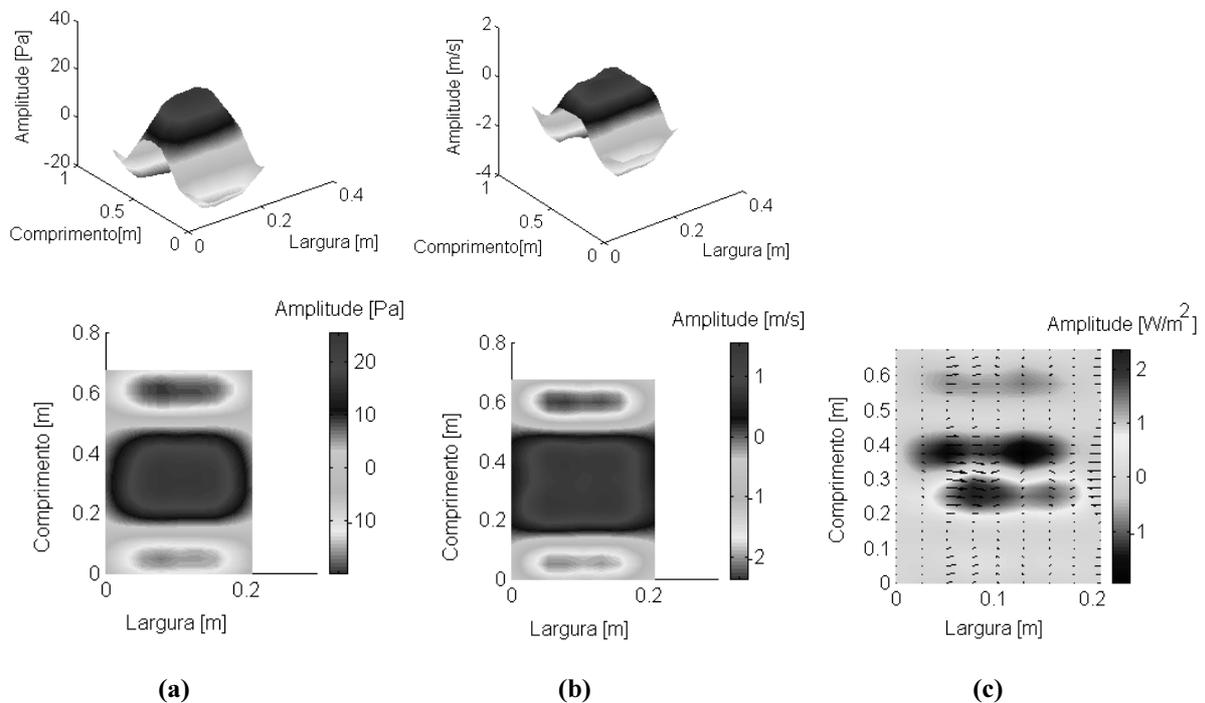


Figura 2 – Reconstrução no plano fonte: (a)pressão acústica, (b)velocidade da partícula e (c)intensidade acústica.

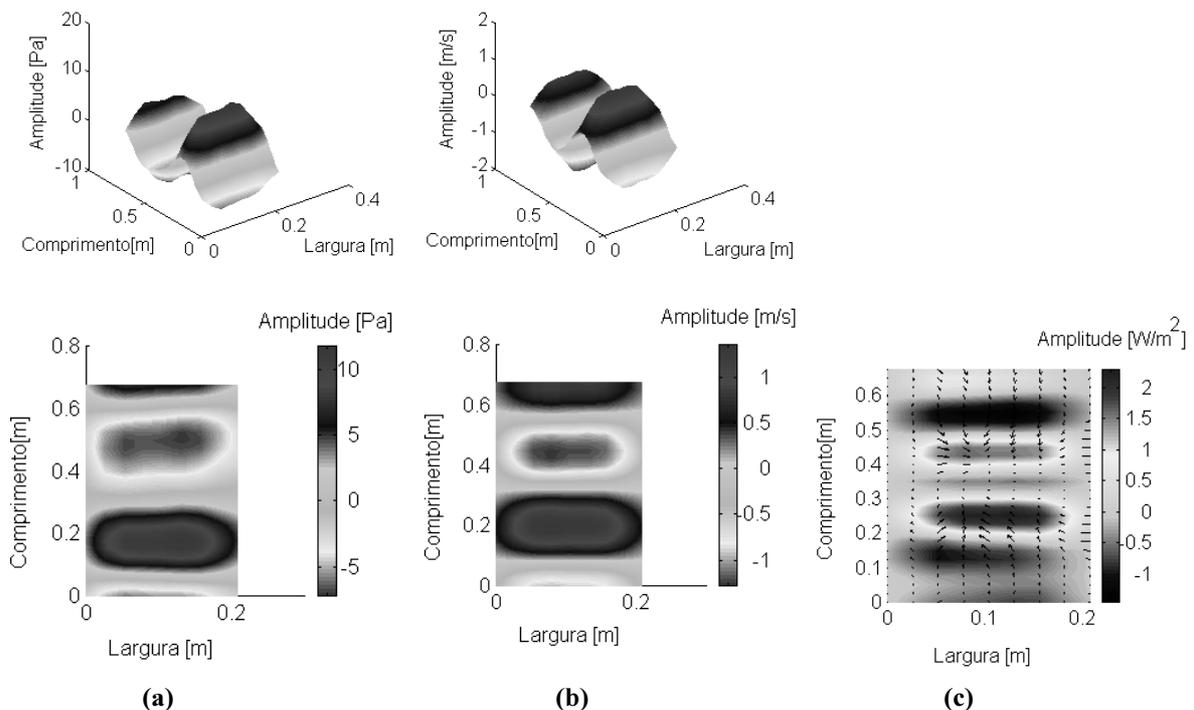


Figura 3 – Reconstrução no plano paralelo ao holograma a 10mm da fonte: (a)pressão acústica, (b)velocidade da partícula e (c)intensidade acústica.

Com objetivo de validar os resultados da NAH, calculou-se a diferença percentual entre os campos de pressão medidos e reconstruídos sobre um mesmo plano. A diferença percentual foi calculada pela expressão

$$\text{diferença}_{\%} = \frac{|\mathbf{P}_M| - |\mathbf{P}_R|}{\|\mathbf{P}_M\|} \times 100 \quad (18)$$

onde \mathbf{P}_M e \mathbf{P}_R são as matrizes dos campos de pressão medido e reconstruído, respectivamente. As medições foram feitas para três planos distantes 10mm, 20mm e 130mm do plano fonte. As reconstruções foram feitas nos mesmos planos mas tomando-se como o holograma o plano a 20mm. A Figura 4 mostra as diferenças entre campos de pressão acústica reconstruído e medido no mesmo plano (vistas 3D e plantas), onde é possível ver que a diferença percentual máxima é inferior a 4% nos planos a 10mm e 20mm da fonte e de 7% no plano a 130mm da fonte.

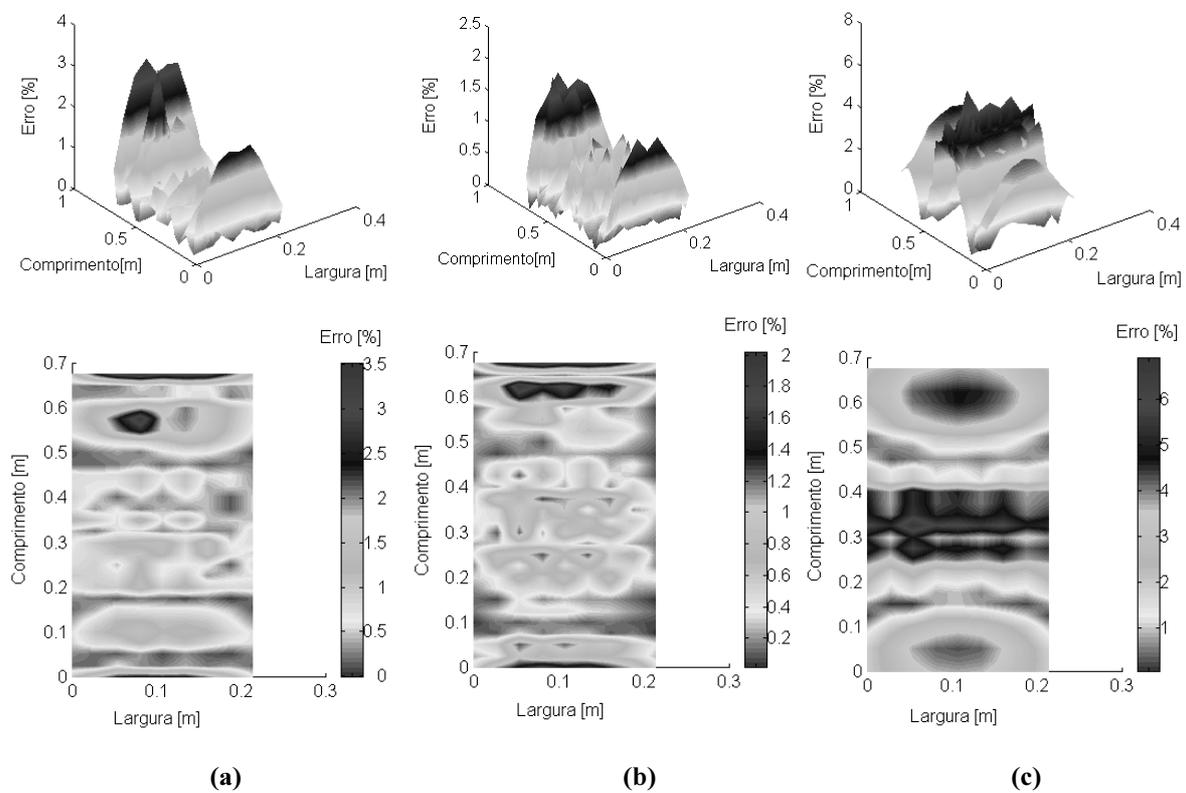


Figura 4 – Diferenças entre os campos de pressão acústica reconstruído e medido em: (a) plano a 10mm da fonte, (b) holograma, (c) plano a 130mm da fonte.

Com o objetivo de avaliar as previsões teóricas destas grandezas com as reconstruídas via NAH, efetuou-se uma análise modal da placa com o Método dos Elementos Finitos - FEM no código ANSYS 5.4. Nesta análise, considerou-se a placa no vácuo discretizada com uma malha de 10 x 30 elementos do tipo SHELL63. Outras duas análises foram realizadas no código SYSNOISE 5.1, utilizando-se o elemento PLATE para o cálculo da placa no vácuo, e depois para a placa com o fluido. No caso do SYSNOISE o código usa o MEF para a análise modal da estrutura e o Método dos Elementos de Contorno – MEC para o fluido. Devido a versão limitada do SYSNOISE a malha teve de ser reduzida para 6 x 10 elementos. Uma comparação dos resultados obtidos para as 6 primeiras frequências naturais está apresentada na Tabela 1. Na comparação entre os resultados para estrutura no vácuo é possível observar

diferenças da ordem de até 9% entre o ANSYS e o SYSNOISE. Tais diferenças são atribuídas a diferenças na discretização da placa e nas formulações do tipo do elemento, SHELL63 e PLATE . Os resultados com a estrutura no fluido foram feitos entre os dados experimentais identificados nas FRF's e aqueles previstos com o SYSNOISE, onde obtiveram-se diferenças da ordem de até 4% nas primeiras freqüências e acima de 7% nas últimas. A última coluna da Tabela 1 mostra as diferenças entre os resultados previstos para a placa no vácuo e com o fluido, as quais mostram-se bem reduzidas (inferiores a 0,5%), tal fato pode ser atribuído ao efeito da densidade do ar.

A Figura 5 mostra uma comparação do campo de pressão reconstruído no plano da placa via NAH com os modos estruturais previstos via SYSNOISE, para os quatro primeiros modos. Pode-se observar que as formas dos modos estruturais previstos são similares a forma do campo de pressão reconstruído na superfície da placa.

Tabela 1 – Freqüências naturais da placa

Estrutura no Fluido			Estrutura no Vácuo			Diferença % Fluido Vácuo no SYSNOISE
Experimental	SYSNOISE	Erro [%]	ANSYS	SYSNOISE	Erro [%]	
37,41	36,56	2,32	37,71	36,74	2,64	0,49
67,90	69,22	1,91	71,52	69,41	3,04	0,27
105,31	101,06	4,21	105,03	101,47	3,51	0,40
146,88	144,20	1,86	151,1	144,54	4,54	0,24
207,85	200,07	3,89	207,31	200,70	3,29	0,31
239,72	230,89	3,82	246,15	231,33	6,41	0,19
340,88	329,82	3,35	341,86	330,31	3,50	0,15
356,12	332,40	7,14	363,35	333,12	9,07	0,22
393,53	367,15	7,19	392,65	368,04	6,69	0,24

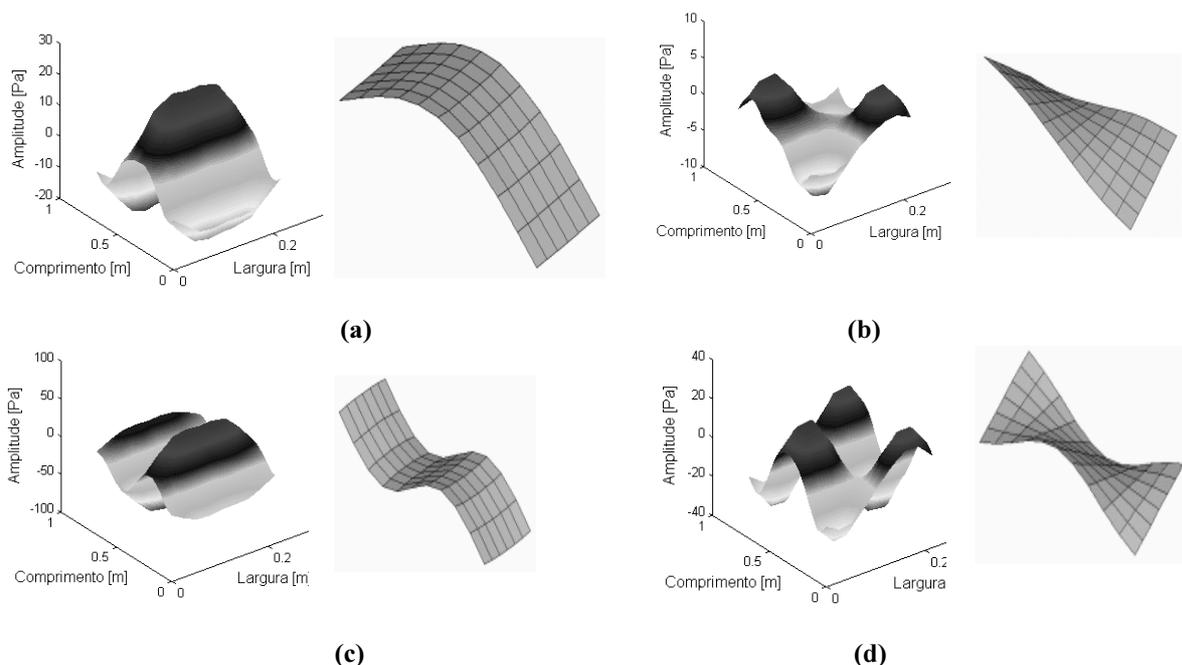


Figura 5 – Campo de pressão reconstruído (NAH) e modo de vibrar previsto (SYSNOISE) da placa. (a) 1º. modo – 37,41 Hz; (b) 2º. modo – 67,90 Hz; (c) 3º. modo – 105,31; (d) 4º. modo – 146,88 Hz.

Para determinar a radiação da fonte para o campo distante, foram realizadas as reconstruções de vários planos paralelos a placa distantes desde 0 até 150 mm, em intervalos de 5 mm. Os resultados mostrados na Figura 6 são as interseções destes planos com um plano perpendicular localizado na linha central da placa. A reconstrução da pressão acústica é feita para as primeiras freqüências dos modos de flexão da placa (1^o., 3^o. e 5^o. modos). O eixo horizontal mostra as posições onde os campos de pressão acústica foram recuperados, com exceção da posição 5, onde o campo medido está sendo mostrado. O eixo vertical mostra as posições ocupadas pela linha de microfones durante o experimento.

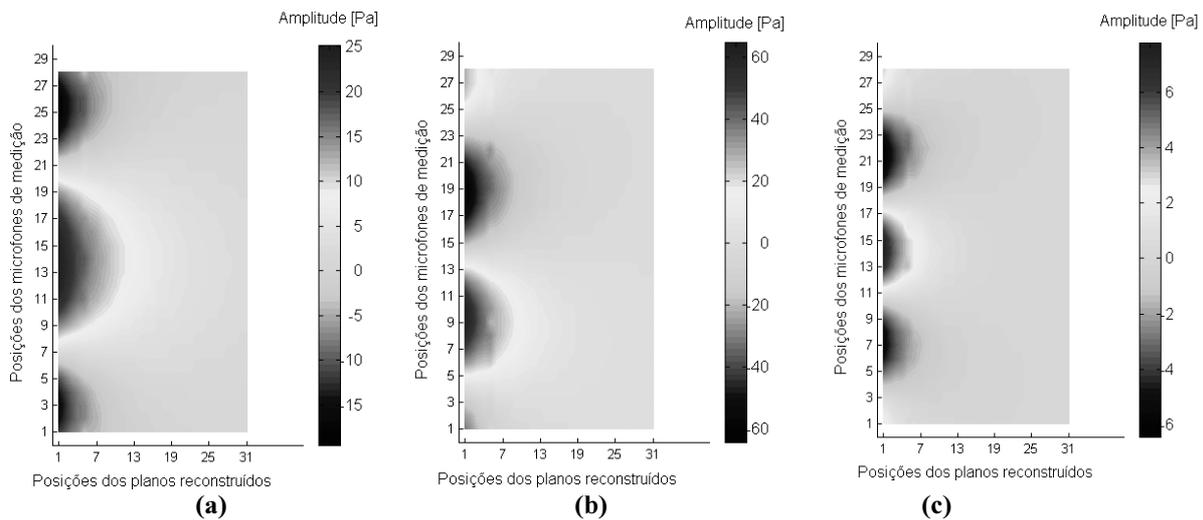


Figura 6 – Radiação do campo de pressão acústica para o campo distante via NAH. (a) 1^o. modo – 37,41 Hz; (b) 3^o. modo – 105,31; (c) 5^o. modo – 207,85 Hz.

5. CONCLUSÕES

A holografia acústica de campo próximo foi usada para reconstruir os campos de pressão acústica, velocidade da partícula e intensidade acústica gerada por uma placa vibrante. O procedimento proposto foi verificado para o campo de pressão acústica usando-se dados medidos e reconstruídos via NAH. Os resultados obtidos mostram que o uso da NAH é adequado para a caracterização das propriedades vibroacústicas investigadas.

As formulações da NAH e da RDFS foram brevemente revistas. Comparações entre os resultados da análise modal da placa: a) no vácuo via SYSNOISE e ANSYS; b) no fluido via SYSNOISE e dados experimentais; c) no vácuo e no fluido via SYSNOISE; foram realizadas e discutidas. Os efeitos benéficos do método da RDFS na diminuição do *leakage* confirmam sua eficiência no tratamento de sinais bidimensionais quando comparado às técnicas de janelamento. A possibilidade de utilização do NAH na obtenção da radiação da fonte para o campo distante é também apresentada.

Embora os resultados apresentados confirmem a utilização da NAH como uma ferramenta eficaz na caracterização de propriedades vibroacústicas de estruturas, deve ser observado que exigências tais como a necessidade de formas planas na fonte e no holograma limitam sua aplicação à superfícies arbitrárias como acontece em muitas aplicações práticas. Contudo, tais dificuldades podem ser vencidas através da determinação de outras Funções de Green mais adequadas, as quais estão sendo correntemente investigadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e a Fundação CAPES, pelo auxílio financeiro na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Ansys, Revision 5.4, 1997, Ansys's Manuals, Swanson Analysis System Inc, Illinois
- Arruda, J. R. F., 1992, Analysis of non-equally space data using a regressive discrete Fourier series, *Journal of Sound and Vibration*, v. 156, n. 3, pp.571-574.
- Kwon, H. S. & Kim, Y. H., 1995, Minimization of bias error due to windows in planar acoustic holography using a minimum error window, *Journal of Acoustical Society of American*, vol. 98, n. 4, pp.2104-2111.
- Maynard, J. D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 78, n. 4, pp. 1395-1413.
- Morse, P. M. & Feshbach, H., 1953, *Methods of theoretical physics*, McGraw-Hill, New York.
- Sysnoise, Revision 5.1, 1993, Sysnoise's Manuals, Numerical Integration Technologies – NIT.

CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL VIBROACOUSTICS PROPERTIES USING NEARFIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

Abstract. *Nearfield acoustic holography is an attractive way to analyze vibroacoustic problems. Holography is a process that allow to determine acoustic field waves characteristics using a Discrete Fourier Transform, from a regular grid of measurements obtained in an acoustic environment for which the Green's Function is known. This paper presents a brief principle's review of this technique with an application on recover the vibroacoustic properties of a structure. In order to minimize spatial leakage problem from signal processing a regressive discrete Fourier series was utilized as an alternative to windowing techniques. Results obtained from a plate type structure were analyzed, validated and compared with theoretical predictions.*

Key-Words: Acoustic Holography, Nearfield Acoustic Holography, Vibroacoustic, Structural Vibrations.