



OPTIMAL SENSOR LOCATIONS TECHNIQUES FOR PARAMETER IDENTIFICATION OF MECHANICAL SYSTEM

Jéssica Carolina Barbosa Vieira

Raíza Marina Vedovatto Loureiro

Fernando Vinícius Morlin

Paulo Rogerio Novak

Dalmarino Setti

je_vieira_@msn.com

raizaloureiro@hotmail.com

fmorlin@alunos.utfpr.edu.br

novak@utfpr.edu.br

dalmarino@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Via do Conhecimento, Km 1 CEP 85503-390, Pato Branco – Paraná – Brasil

Abstract. *Este trabalho buscou verificar experimentalmente o posicionamento ótimo de sensores em uma viga de aço. Primeiramente, utilizou-se um modelo matemático previamente desenvolvido com parâmetros calculados e, a partir disso, obteve-se a resposta ao impulso. Para o experimento, utilizou-se uma viga engastada, excitada por um martelo de impacto em determinado ponto da estrutura e enviada para um acelerômetro em diferentes pontos. A metodologia de posicionamento utilizada foi de forma visual, em que se analisou as respostas em frequência e então a comparação de resultados foi feita. Foram tomados como base resultados obtidos pelo método Resíduo para um sistema contínuo. O método Resíduo é dito como um fator de participação melhorado que, além de observar as posições em que o sensor pode ser colocado, também analisa a posição em que a força foi aplicada, e assim por operações iterativas escolhe a melhor posição do sensor para o sistema. Na comparação entre a simulação numérica e experimental foram observados resultados similares, o que também indica que o método Resíduo pode ser aplicado.*

Keywords: *Posicionamento de sensores, verificação experimental, análise modal experimental, método Resíduo.*

1 INTRODUÇÃO

A atual exigência no desempenho de sistemas mecânicos e estruturais leva à necessidade de estruturas leves, resistentes, controláveis e que, ao mesmo tempo, não acarretem em aumentos elevados de custos.

No projeto de novos produtos e equipamentos, desde uma simples viga, passando por um automóvel até sistemas mais complexos, como por exemplo, uma aeronave, é muito importante a análise do seu comportamento dinâmico estrutural, buscando obter seus parâmetros próprios, frequências naturais, razão de amortecimento e modos de vibrar (PRAZZO, 2011). Ao conhecer esses parâmetros é possível prever e evitar futuras falhas, como, por exemplo, a coincidência ou proximidade da frequência de excitação e da frequência natural. Para a análise do comportamento dinâmico da estrutura, recorre-se, em geral, à utilização integrada da modelação numérica e da identificação experimental de parâmetros modais. O comportamento estrutural do modelo pode ser estudado utilizando diferentes modelagens, por exemplo, o método dos elementos finitos (BATHE; WILSON, 1976; ZIENKIEWICZ, 1985). O método dos elementos finitos é usual na maioria das análises e projetos de sistemas mecânicos estruturais, entretanto nem sempre é possível incluir todos os parâmetros e variáveis no modelo matemático e sua resposta é geralmente aproximada, por esse motivo a análise modal experimental vem ao encontro dessas técnicas numérico-analíticas na tentativa de solucionar esse problema, de forma que os parâmetros e a resposta do modelo são obtidos diretamente da própria estrutura de interesse a partir da relação excitação-resposta em testes experimentais (PRAZZO, 2011).

Para a medição da resposta do sistema são utilizados geralmente sensores, devido a sua capacidade de gerar respostas precisas. Entretanto, um mau posicionamento e um número indevido de sensores podem acarretar em problemas como minimização ou não detecção de valores modais significativos, aumento do peso e alteração da rigidez do sistema original, interferindo, conseqüentemente, nas medições.

O estudo de técnicas para localização ótima de sensores em sistemas para testes de vibrações tem recebido cada vez mais notoriedade entre os estudiosos e constitui um ponto essencial na análise dinâmica de sistemas e estruturas. Por exemplo, Gawronski (1997) estuda o posicionamento de sensores usando os modos de vibrar, a observabilidade e controlabilidade modal. No trabalho de Moheimai (1999) a medida de controlabilidade modal foi usada para encontrar o posicionamento ótimo de sensores. De outro lado, se posicionados em localizações ótimas, o número de atuadores e sensores necessário pode ser reduzido, diminuindo assim o custo de instrumentação, do processamento de sinais e da energia necessária para o controle da estrutura (BUENO and MARQUI, 2000).

Neste contexto, o presente trabalho avalia experimentalmente o posicionamento ótimo de um acelerômetro em uma viga de aço, engastada em uma das extremidades. Os resultados são apresentados com a simulação numérica em uma viga discretizada em 50 elementos através do método dos elementos finitos. A verificação experimental é feita para 17 posições candidatas. Os sinais de entrada foram gerados utilizando um martelo de impacto e um atuador piezelétrico.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho se procurou definir quais localizações os sensores devem ser posicionados, considerando um número limitado de sensores. Para tanto, o método Resíduo foi utilizado.

O método Resíduo pode ser dito como um fator de participação melhorado, pois faz uma análise combinatória entre as posições do sensor e a força aplicada. Para realçar esta relação, a definição $P_{ki} = V_{ki}V^{-1}_{ik}$ pode ser reescrita como:

$$R_e = cC V^{-1}_{ik} V_{ki} b \quad (1)$$

Onde R_e é o resíduo do sistema, cC é a posição do sensor e b é força que será aplicada em uma dada posição. A partir dessa equação observa-se que fatores de participação são elementos da diagonal das matrizes de resíduos. Em outras palavras, a coluna de ordem i da matriz Fator de participação é a diagonal da matriz resíduo R .

Para o sistema analisado, o método do resíduo indicou que a extremidade livre dos sistema engastado é a melhor posição, tanto para aplicação da força quanto para posição do sensor.

O método Resíduo observa as posições em que o sensor pode ser colocado e também analisa a posição em que a força foi aplicada, e assim por operações iterativas escolhe a melhor posição do sensor para o sistema. Porém, a desvantagem do método está no fato de que ele faz a seleção final da melhor posição através da exclusão das posições com os mínimos valores de resposta e assim é possível que exclua mutuamente uma posição candidata que poderia ser ótima.

O experimento foi realizado em três etapas: Aplicação do método do Resíduo, análise numérica do sistema, análise experimental do sistema e comparação dos resultados.

2.1 Análise modal teórica

Primeiramente, foi desenvolvido um modelo matemático com parâmetros previamente calculados, após isto se obteve a resposta ao impulso e sua análise. A modelagem numérico-computacional da viga empregou técnicas usuais de discretização via elementos finitos por meio da utilização do programa MATLAB®, baseado nas características físicas e geométricas de uma viga com uma das extremidades engastadas. A viga foi discretizada em 50 elementos estruturais e 51 nós, embora a análise da resposta ao impulso tenha sido feita para 17 nós, em que se exclui o nó relativo ao engaste, conforme representado esquematicamente na Figura 1, sendo essas posições equivalentes às posições das medições experimentais.

Com a discretização da viga, considera-se 3 graus de liberdade por nó gerando um total de 153 modos de vibração. Porém, apenas os quatro primeiros modos foram utilizados para se obter a análise do sistema.

As matrizes massa e rigidez para o sistema de viga engastada foram obtidas via elementos finitos com o auxílio do software MATLAB®. Uma força de impacto unitária é aplicada ao nó equivalente à extremidade da viga e a resposta no domínio do tempo é medida em todas as posições candidatas. Aplicando a transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) obtemos a Função Resposta em Frequência (FRF) do sistema.

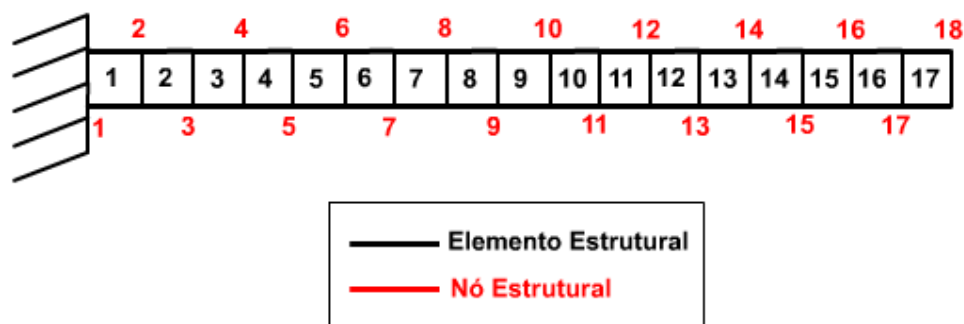


Figura 1. Elementos e nós da viga de aço 1020.

A Tabela 1 mostra as propriedades físicas e geométricas da estrutura.

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas da viga.

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade	202 GPa
Módulo de cisalhamento	78 GPa
Comprimento	300 mm
Largura	15 mm

2.2 Análise modal experimental

Na análise modal experimental, os parâmetros do modelo são obtidos a partir da relação entrada/saída (PRAZZO, 2011). Para a caracterização dos parâmetros modais da viga foi utilizada a análise modal experimental utilizando como sensor um acelerômetro e como atuador um martelo de impacto (Figura 2).

A Figura 2 apresenta a viga de aço 1020 engastada em uma das extremidades. O sistema de aquisição utiliza dois canais de aquisição de dados. Um canal conectado ao martelo de impacto e o outro canal conectado ao acelerômetro. O sistema foi excitado no nó 18, e os dados foram colhidos em todas as 17 posições candidatas. A mudança da posição do sensor era feita à medida que o sinal obtido fosse considerado satisfatório, com a primeira medição no nó 18, até que se alcançasse a posição mais próxima ao engaste, nó 2.

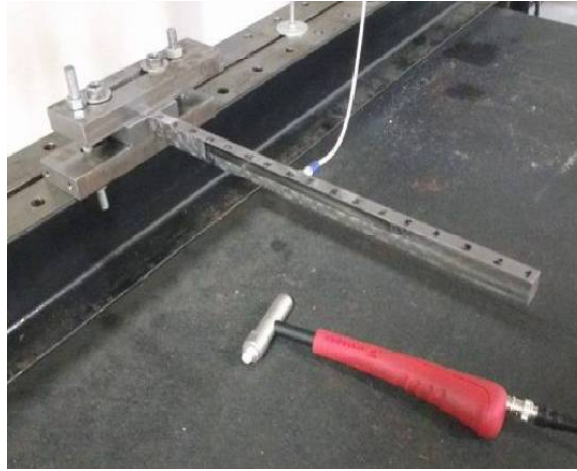


Figura 2: Viga de aço 1020 e condições de ensaio

A estimativa dos parâmetros modais do modelo a partir das FRF(s) medidas foi feita utilizando o método RFP (*Rational Fraction Polynomial*).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira para comparação dos resultados foi garantir que cada ponto a ser analisado fosse equivalente, no que diz respeito à posição da viga, na análise numérica e na experimental. Desta forma, dividiu-se a viga do modelo numérico-computacional em 50 elementos estruturais. Assim, comparou-se as posições da viga definidas no experimento com o vetor das posições do modelo simulado, para que comparação entre as respostas em frequência fosse feita apenas para as 17 posições candidatas. As Figuras 3(a) e 3(b), representam, respectivamente, os modos de vibrar obtidos numericamente e experimentalmente a partir das funções resposta em frequência.

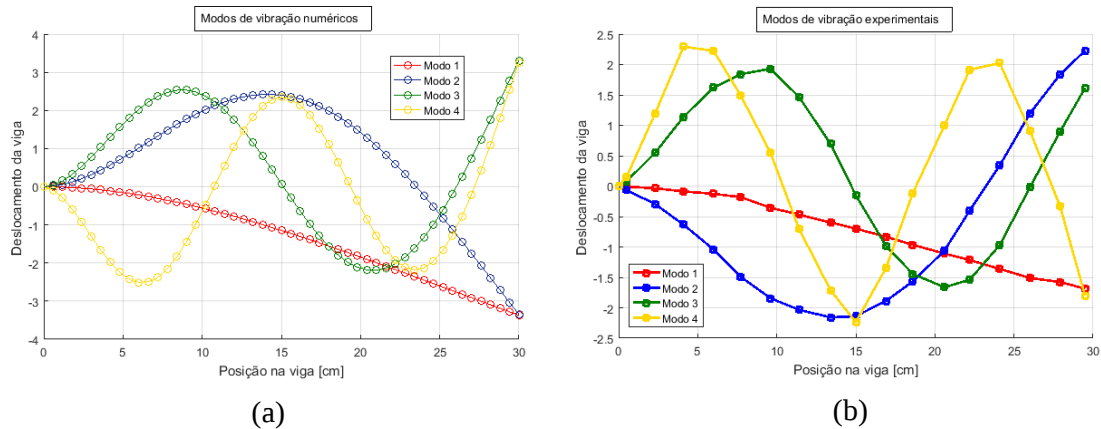


Figura 3. Modos de vibração. (a) obtidos numericamente, (b) obtidos experimentalmente

A análise e comparação para definição da melhor posição foi feita de forma visual, através da análise das FRFs obtidas e do gráfico dos modos de vibração. O ponto considerado como ótimo foi aquele em que se conseguiu observar, com valores consideráveis, no espectro da frequência, a presença dos quatro primeiros modos de vibrar.

Levando em consideração a dimensão do sistema contínuo, para fins representativos, a resposta ao impulso para o sistema de viga engastada está representada esquematicamente. A representação foi feita para o ponto ótimo e, de modo a explicitar a validade dos resultados, para um dos pontos inapropriados para o sistema em questão.

Para a resposta do sensor no nó 16 com força aplicada no nó 18, Figura 4, embora se perceba um valor alto para os demais modos, o deslocamento é próximo à zero para o terceiro, pois se localiza próximo ao chamado ponto modal. Isso é constatado tanto na análise da FRF, caso numérico e experimental, quanto se observando o gráfico dos modos de vibração, figura 4. Em caso de se localizar o sensor nessa posição candidata, acabaríamos por minimizar a resposta obtida para o terceiro modo.

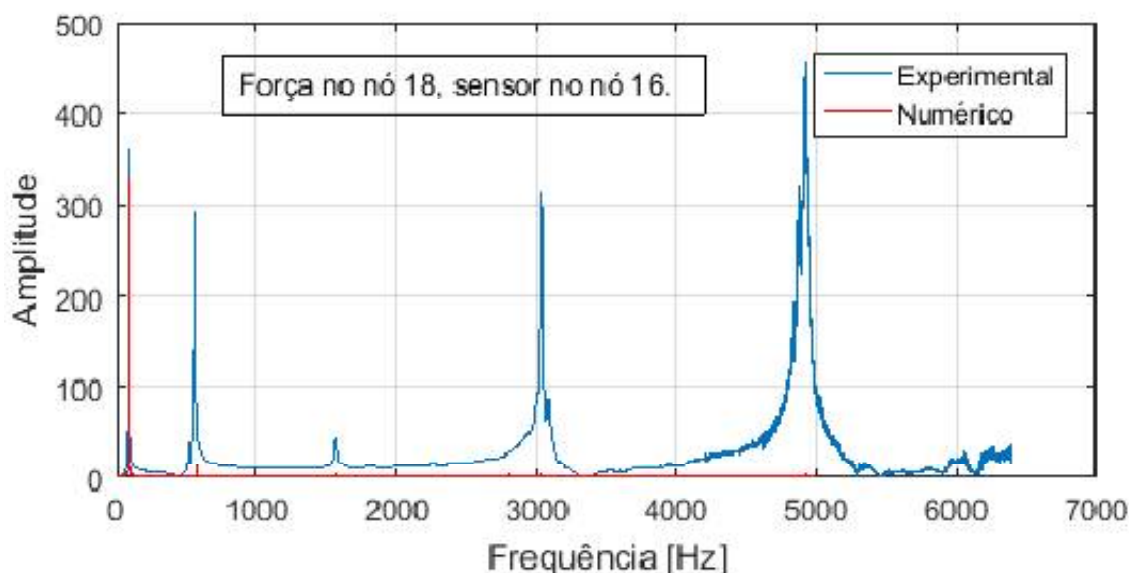


Figura 4. Função resposta em frequência, sensor no nó 16

A resposta para o sensor no nó 18 com força aplicada no nó 18, Figura 5, representa a melhor posição, ou seja, a posição ótima. Observa-se claramente a presença dos quatro primeiros modos com valores consideráveis. Em caso de se localizar o sensor nessa posição candidata, obter-se-ia uma resposta precisa, podendo-se estimar os parâmetros modais e garantindo uma análise mais completa.

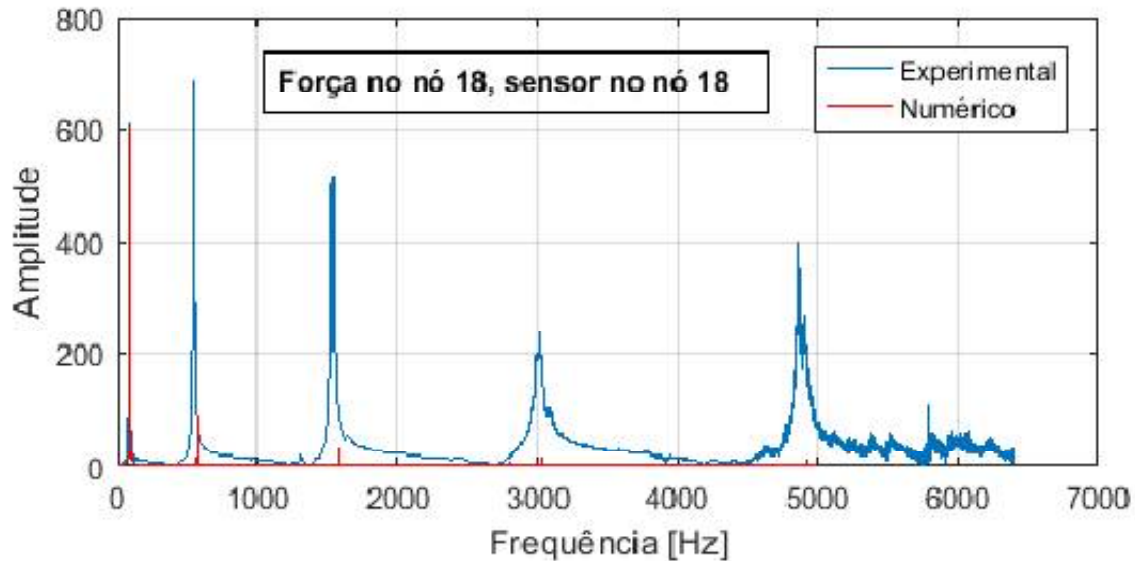


Figura 5. Função resposta em frequência, sensor no nó 18

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as frequências naturais obtidas numericamente e experimentalmente para o nó 18. Nota-se uma diferença máxima de 7 % para a frequência do quarto modo de vibrar.

Tabela 2. Frequências naturais obtidas.

Modo de vibrar	Frequência natural [Hz]		Diferença [%]
	Numérico	Experimental	
1º	91,02	87	4,6
2º	568,1	545	4,2
3º	1572	1537	2,3
4º	3036	3015	7,0

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou experimentalmente o posicionamento ótimo de um acelerômetro em uma viga de aço engastada em uma das extremidades. A representação dos resultados foi feita para uma simulação numérica em uma viga discretizada em 50 elementos através do método dos elementos finitos e verificada experimentalmente para 17 posições candidatas de uma viga com propriedades físicas e geométricas semelhantes.

Na comparação entre a simulação numérica e experimental, embora o amortecimento tenha sido desprezado na análise numérica, foram observados resultados similares, o que também indica que o método Resíduo pode ser aplicado.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, da Fundação Araucária e a UTFPR - Câmpus Pato Branco.



6 REFERÊNCIAS

- BATHE, J.; WILSON, E. L. (1976). Numerical methods in finite element analysis. EnglewoodCliffs: Prentice-Hall, 528p.
- BUENO, D. D.; MARQUI, C. R. 2000. Verificação experimental do posicionamento ótimo de sensores utilizando matrizes grammianas.
- GAWRONSKI, W. (1997) Actuator and sensor placement for structural testing and control. Journal of Sound and Vibration, vol. 208, no. 1, pp. 101-109.
- MOHEIMAI, S.; RYALL, T. (1999) Considerations in placement of piezoceramic actuators that are used in structural vibration control. Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona, USA. pp. 1118-1123.
- PRAZZO, C. E. . (2011). Análise modal de uma estrutura do tipo viga utilizando materiais piezelétricos (PVDF) como sensores. 139 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94521>>.
- ZIENKIEWICZ, O. C. (1985). The finite element method. 3. ed. London: McGraw-Hiil.