

# MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA: UMA AVALIAÇÃO DAS BANDAS DE FREQUÊNCIA

**José dos Reis Vieira de Moura Jr**

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica 38400-902 – Uberlândia – MG – Brasil.

jrvmoura@mecanica.ufu.br

**Valder Steffen Jr**

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica 38400-902 – Uberlândia – MG – Brasil.

vsteffen@mecanica.ufu.br

**Resumo.** Pela troca dos conceitos de projetos em engenharia de “vida útil segura” para o “tolerante à falhas”, tornou-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas para identificação de falhas que possibilitem um acréscimo significativo de sensibilidade durante as medições. Este trabalho utiliza o método de identificação de falhas em vigas pelo método baseado em impedância elétrica. Um elemento piezoelétrico, pastilhas de PZT, é acoplado à estrutura em estudo, no caso uma viga do tipo Euler-Bernoulli. Posteriormente, os sinais de impedância elétrica são medidos através do PZT, sendo este responsável por associar a impedância elétrica do PZT com a impedância mecânica da viga. Como a impedância mecânica está associada à rigidez estrutural da viga, e esta, relacionada a critérios de falha, é possível concluir que mecanismos de falha em estruturas podem ser identificados pela medição da impedância elétrica. São avaliadas neste trabalho bandas de freqüências para o processo de monitoramento da falha. Para esta avaliação foram adotados três parâmetros (início da banda de freqüência, largura da banda e tipo do sinal capturado), gerando-se superfícies de resposta que são capazes de representar o sistema dentro da região do domínio avaliado, tornando possível o processo de monitoramento à falhas mais sofisticado e sensível.

**Palavras-chave:** Monitoramento estrutural baseado em impedância, Planejamentos fatoriais, Estruturas inteligentes.

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de técnicas estatísticas tal como planejamentos fatoriais têm sido utilizados em vários problemas em engenharia, como descrito por Barros Neto, Scarminio e Bruns (1995) e por Montgomery (1991). Através destas técnicas é possível compreender o comportamento do sistema usando um pequeno número de experimentos. Então, os meta-modelos das superfícies de resposta podem ser calculados e o projeto ótimo ser obtido. Entretanto o meta-modelo geralmente representa uma pequena região do espaço de projeto. Na área de análises de vibrações, tem sido mostrado que o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos podem ser expressos por meta-modelos representativos (Butkewitsch and Steffen Jr, 2002) e (Moura Jr and Steffen Jr, 2003).

Por outro lado, ferramentas de avaliação não destrutivas (Non-Destructive Evaluation – NDE) tais como a técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada em impedância tem sido discutida por cerca de vinte anos (Cawley, 1984), mas somente mais recentemente têm surgido publicações com aplicações de maior interesse. A idéia é comparar o nível de vibração monitorada

do sistema, comumente a função resposta em freqüência com um nível de vibração padrão o qual corresponde à estrutura sem falhas, objetivando identificar mudanças no estado atual do sistema. Por este motivo, pastilhas piezoelétricas (PZTs) são coladas à estrutura para medir os sinais de impedância da estrutura. O PZT é responsável pela conversão da impedância mecânica da estrutura o qual é intimamente relacionada com a rigidez ou integridade do sistema. A medida da impedância elétrica do PZT é apta a determinar a variação de impedância da estrutura para qualquer falha estrutural considerável.

Um importante aspecto da técnica mencionada é a determinação correta da banda de freqüência mais sensível para realização do monitoramento de integridade estrutural. Em geral, a obtenção da banda para uma dada estrutura é determinada pelo método de tentativa e erro (Giurgiutiu and Zagrai, 2002 e Raju, 1997).

Neste estudo, um procedimento baseado em superfícies de resposta é desenvolvido para determinar os parâmetros de teste para identificação de falha através do método de impedância.

## 2. METODOLOGIA

A viga flexível de alumínio utilizada no experimento e o PZT (estrutura flexível e sensor) tem as seguintes propriedades geométricas:  $a = 303$ ;  $b = 3.9$ ;  $c = 31.75$ ;  $d = 51.4$ ;  $e = 26$ ;  $f = 190$  [mm], como mostradas nas Fig. (1a e b).

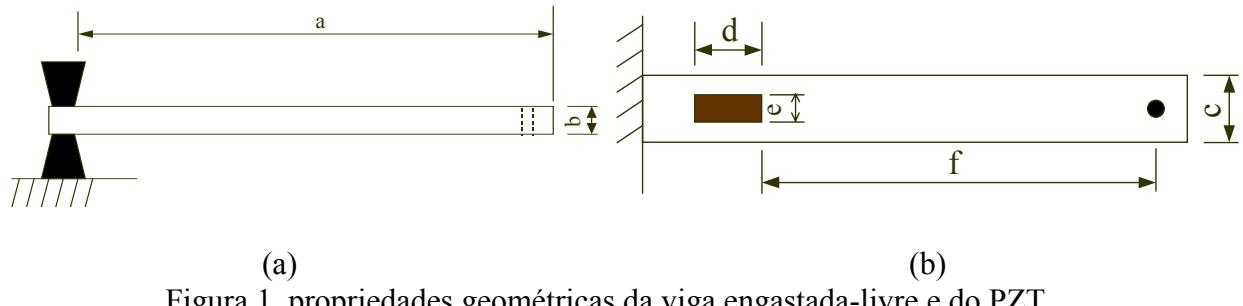


Figura 1. propriedades geométricas da viga engastada-livre e do PZT

O dispositivo experimental equivalente é mostrado na Fig. (2a e b).

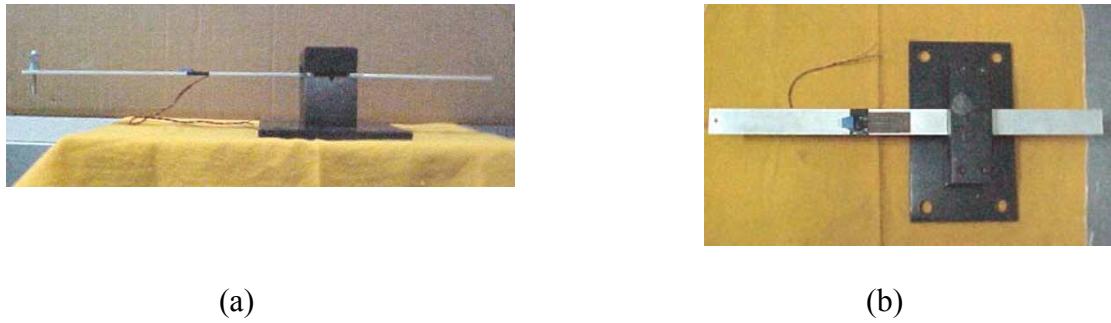


Figura 2. viga engastada-livre



Figura 3. analisador de impedância HP4194A

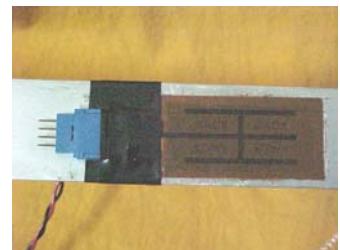


Figura 4. PZT (ACX) colado à viga



Figura 5. massa de adição



Figura 6. conjunto experimental

A impedância elétrica foi medida utilizando-se o analisador de impedância HP4194A, como mostrado pela Fig. (3). Um código C++ foi escrito para tornar possível o processo de aquisição de dados através de uma placa GP-IB instalada no microcomputador. Um PZT ACX foi colado à estrutura como mostra a Fig. (4).

Tabela 1. planejamento experimental  $4 \times 3^2$  com pontos centrais e faixa completa.

| Experimentos | Primeiro fator (menor freqüência) [KHz] | Segundo fator (largura de faixa de freqüência) [KHz] | Terceiro fator (tipo do sinal) | Faixa operacional [KHz] |
|--------------|---|--|--------------------------------|-------------------------|
| 1            | 15                                      | 2  | $ Z $                          | 15-17                   |
| 2            | 15                                      | 2  | R                              | 15-17                   |
| 3            | 15                                      | 2  | X                              | 15-17                   |
| 4            | 19                                      | 2  | $ Z $                          | 19-21                   |
| 5            | 19                                      | 2  | R                              | 19-21                   |
| 6            | 19                                      | 2  | X                              | 19-21                   |
| 7            | 23                                      | 2  | $ Z $                          | 23-25                   |
| 8            | 23                                      | 2  | R                              | 23-25                   |
| 9            | 23                                      | 2  | X                              | 23-25                   |
| 10           | 27                                      | 2  | $ Z $                          | 27-29                   |
| 11           | 27                                      | 2  | R                              | 27-29                   |
| 12           | 27                                      | 2  | X                              | 27-29                   |
| 13           | 15                                      | 4  | $ Z $                          | 15-19                   |
| 14           | 15                                      | 4  | R                              | 15-19                   |
| 15           | 15                                      | 4  | X                              | 15-19                   |
| 16           | 19                                      | 4  | $ Z $                          | 19-23                   |
| 17           | 19                                      | 4  | R                              | 19-23                   |
| 18           | 19                                      | 4  | X                              | 19-23                   |
| 19           | 23                                      | 4  | $ Z $                          | 23-27                   |
| 20           | 23                                      | 4  | R                              | 23-27                   |
| 21           | 23                                      | 4  | X                              | 23-27                   |
| 22           | 27                                      | 4  | $ Z $                          | 27-31                   |
| 23           | 27                                      | 4  | R                              | 27-31                   |
| 24           | 27                                      | 4  | X                              | 27-31                   |
| 25           | 15                                      | 6  | $ Z $                          | 15-21                   |
| 26           | 15                                      | 6  | R                              | 15-21                   |
| 27           | 15                                      | 6  | X                              | 15-21                   |
| 28           | 19                                      | 6  | $ Z $                          | 19-25                   |
| 29           | 19                                      | 6  | R                              | 19-25                   |
| 30           | 19                                      | 6  | X                              | 19-25                   |
| 31           | 23                                      | 6  | $ Z $                          | 23-29                   |
| 32           | 23                                      | 6  | R                              | 23-29                   |
| 33           | 23                                      | 6  | X                              | 23-29                   |
| 34           | 27                                      | 6  | $ Z $                          | 27-33                   |
| 35           | 27                                      | 6  | R                              | 27-33                   |
| 36           | 27                                      | 6  | X                              | 27-33                   |
| 37           | 21                                      | 4  | $ Z $                          | 21-25                   |
| 38           | 21                                      | 4  | R                              | 21-25                   |
| 39           | 21                                      | 4  | X                              | 21-25                   |
| 40           | 15                                      | 18   | R                              | 15-33                   |

Uma falha induzida foi introduzida no sistema pela adição de uma pequena massa de aproximadamente 13 g (Fig. (5) – escala em cm) na extremidade livre da estrutura. A Fig. (6) mostra o conjunto experimental completo.

O tipo de sinal mais utilizado para análise de impedância é o tipo  $R$ , o qual corresponde à parte real da impedância. Neste estudo, a parte real, a imaginária e o módulo da impedância foram avaliados para fins de monitoramento de integridade estrutural.

Desta forma, na presente contribuição, três fatores foram avaliados para monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância, sendo eles a menor freqüência a ser utilizada, a extensão de freqüência e o tipo de sinal usado. Os valores de referência dos testes experimentais foram os seguintes:  $OSC\ Level = 1\ volt$ ; número de médias = 8; pontos amostrados = 401. A melhor faixa de freqüência encontrada por tentativa e erro foi a de 15 a 33 KHz.

Um planejamento fatorial  $4 \times 3^2$  foi realizado para determinar as condições ótimas para monitoramento da integridade estrutural. Quatro níveis de freqüência foram definidos para obter a menor freqüência a ser utilizada: 15, 19, 23, 27 KHz. Analogamente, para a largura de freqüência, três níveis foram considerados: 2, 4 e 6 KHz. Finalmente, para o tipo do sinal, três níveis foram levados em consideração:  $|Z|$ , o módulo da impedância;  $R$ , a parte real;  $X$ , a parte imaginária. A Tab. (1) mostra todos os 40 experimentos de acordo com o seguinte esquema: os primeiros 36 experimentos correspondem a um planejamento fatorial  $4 \times 3^2$ , os experimentos 37 a 39 correspondem aos experimentos de pontos centrais e o último corresponde ao experimento de toda a faixa de freqüência.

Todos os experimentos foram feitos aleatoriamente, sem repetições. Cada experimento foi realizado duas vezes: com e sem massa de adição.

### 3. RESULTADOS

Figura (7) mostra as diferenças entre dois sinais (com e sem falha). Nela podem ser observados os experimentos no. 13, 14 e 15 que apresentam a melhor performance, quando comparados com os demais ensaios quanto à sensibilidade do processo de monitoramento da falha. O experimento no. 40 foi tomado como referência para comparações neste caso, já que ele corresponde ao procedimento de teste normalmente adotado.

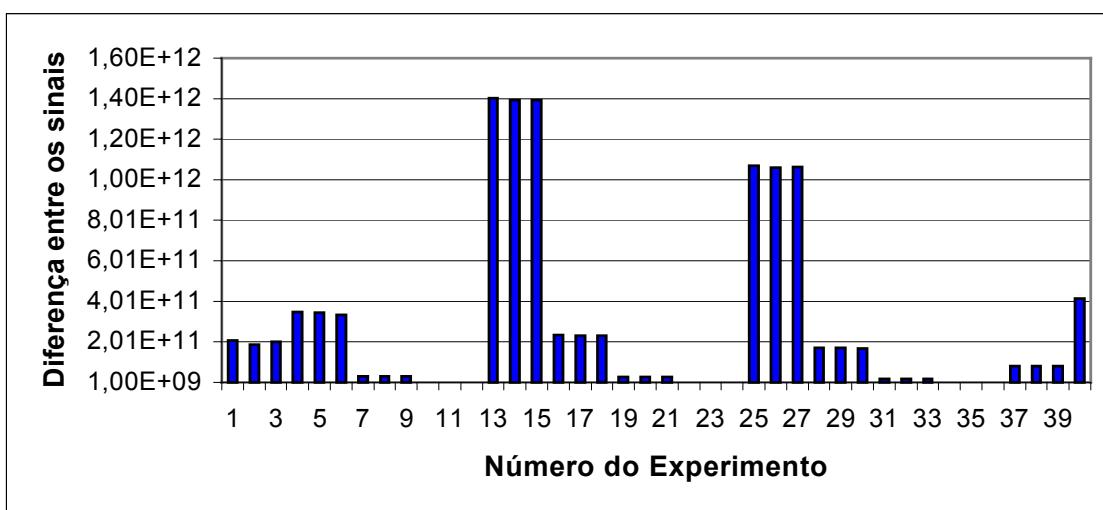


Figura 7: diferenças entre os dois sinais (com e sem falha)

Sete meta-modelos foram avaliados para escolher qual deles melhor representa o sistema em estudo dentro do domínio das condições de teste. Para este fim, cada modelo foi submetido a um teste de hipótese (teste F) para comparar dois meta-modelos consecutivos com respeito à capacidade de representação do sistema. Os resíduos dos 40 testes correspondentes, bem como as

superfícies de resposta e a análise de variância (ANOVA) para cada meta-modelo são apresentados a seguir.

O primeiro meta-modelo é linear e leva em consideração apenas os fatores isolados, isto é, a função objetivo é representada por quatro termos, a saber, os três fatores considerados mais o termo independente. A distribuição dos resíduos é apresentada na Fig. (8). Pode ser observado que a curva resultante é distribuída em torno de zero. Isto significa que este experimento pode ser considerado para fins de avaliações estatísticas.

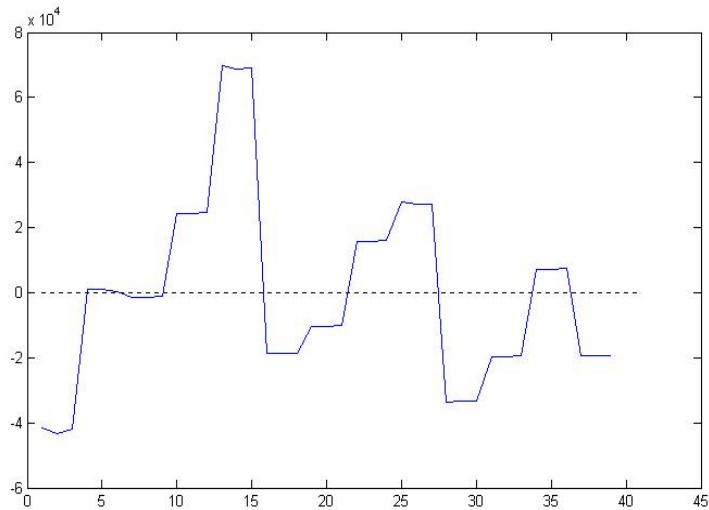


Figura 8. distribuição dos resíduos para o meta-modelo linear.

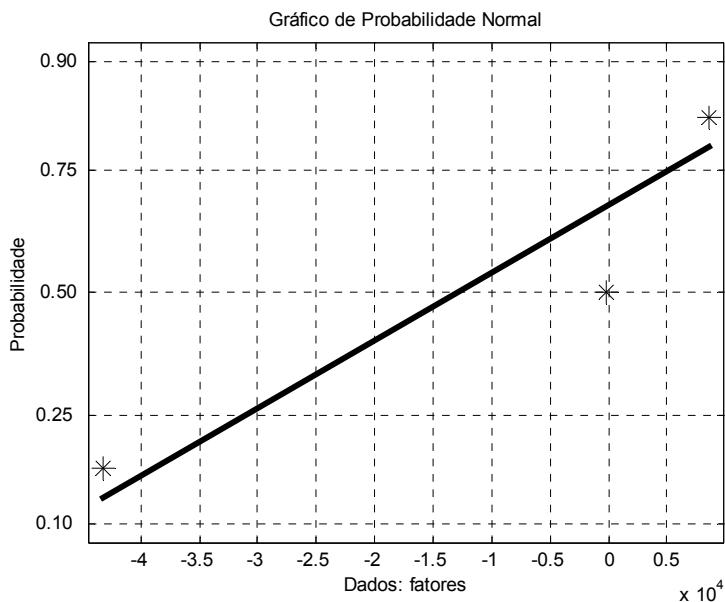


Figura 9. distribuição de probabilidade normal para o meta-modelo linear.

A Fig. (9) ilustra a distribuição de probabilidade normal para os três fatores do meta-modelo linear (o termo independente não foi incluído)

A distribuição normal é usada para demonstrar que os três fatores considerados no meta-modelo linear não são apenas variações aleatórias, isto é, estes fatores fazem parte do processo.

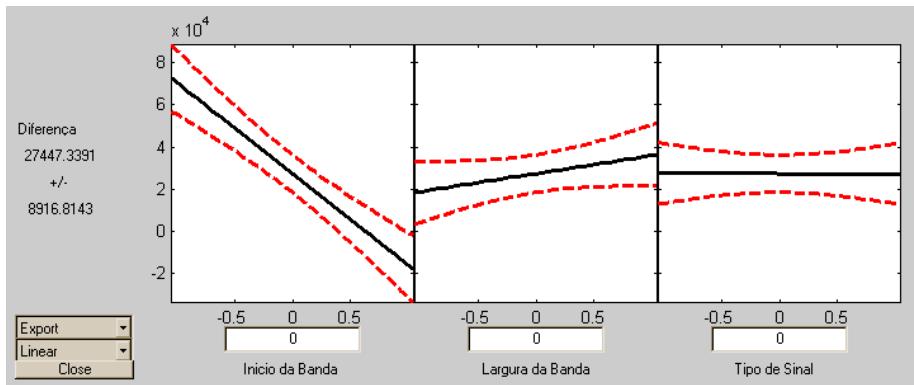


Figura 10. superfícies de resposta para o meta-modelo linear.

A Fig. (10) mostra as superfícies de resposta para o meta-modelo linear, no qual os três fatores são descritos. As curvas contínuas representam as superfícies de resposta e as duas curvas tracejadas representam os intervalos de confiança para 95%. Os fatores foram normalizados no intervalo  $-1$  e  $1$ .

Tabela 2. ANOVA do meta-modelo linear.

ANOVA da regressão

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Nº de gdl | Média Quadrática |
|-------------------|-----------------|-----------|------------------|
| Regressão         | 3.906e+010      | 3         | 1.302e+010       |
| Resíduos          | 3.171e+010      | 35        | 9.06e+008        |
| F. Ajuste         | 3.171e+010      | 35        | 9.06e+008        |
| Erro Puro         | 0               | 0         | 0                |
| Total             | 7.077e+010      | 38        |                  |

% variação explicada: 0.5519

% máxima de variação explicável: 1

A Tab. (2) mostra a ANOVA para o meta-modelo linear. O erro puro é zero porque não foram realizadas repetições, isto é, o sinal de impedância não varia (é automaticamente realizada uma média pelo analisador de impedância no sinal capturado). A variação explicada resultante é cerca de 55%, isto é, o fenômeno não é satisfatoriamente representado pelo meta-modelo linear.

Tabela 3. coeficientes da regressão polinomial.

|                 | Valor (x 10 <sup>4</sup> ) |
|-----------------|----------------------------|
| Constant        | 1.83301172901132           |
| f2              | -4.31886463219167          |
| f1              | 0.85389344427083           |
| f3              | -0.01426047619231          |
| f2 x f1         | -1.83526899581250          |
| f2 x f3         | 0.02119315117500           |
| f1 x f3         | 0.00408182512500           |
| f2 x f1 x f3    | 0.00026891272500           |
| f2 <sup>2</sup> | 3.70289119317454           |
| f1 <sup>2</sup> | -1.60419411564300          |

Para o sétimo meta-modelo, os coeficientes do polinômio são dados pela Tab. (3), onde  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  são associados, respectivamente, com a menor freqüência da banda, a largura de banda e o tipo do sinal usado no ensaio.

Neste caso também a curva de distribuição dos resíduos foi em torno de zero, como ilustrado na Fig. (11). Novamente, isto significa que este experimento pode ser considerado para fins de avaliação estatística.

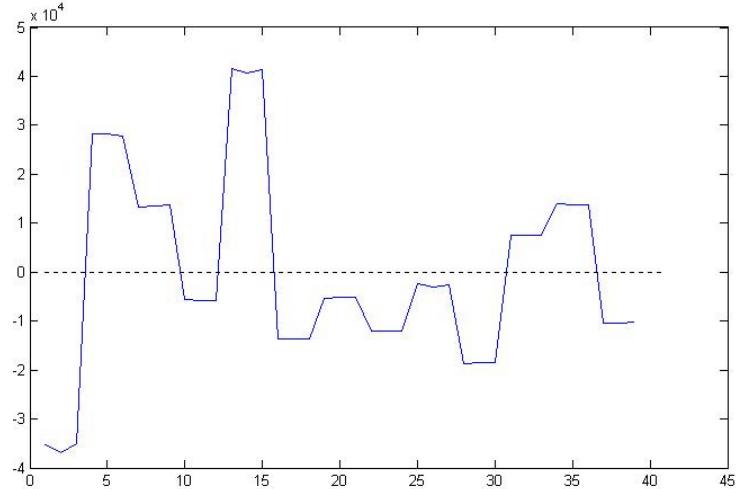


Figura 11. distribuição dos resíduos para o meta-modelo final.

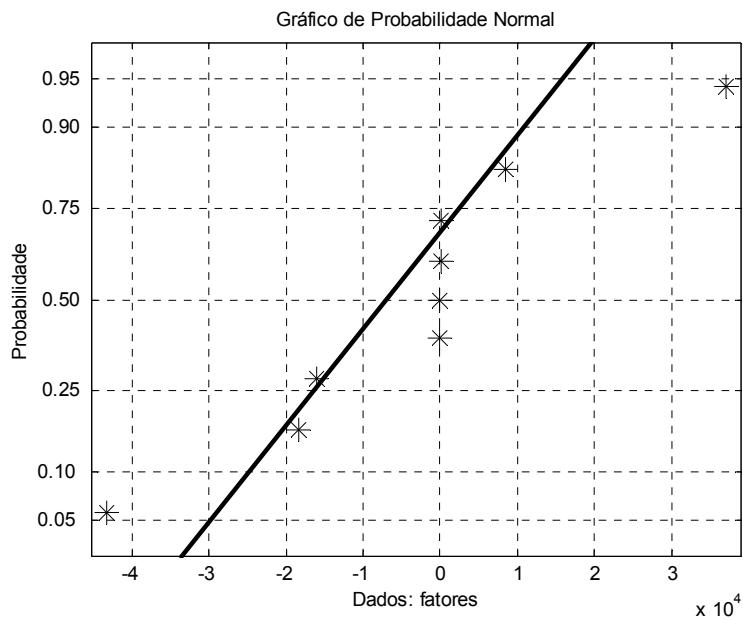


Figura 12. distribuição de probabilidade normal para o meta-modelo final.

A Fig. (12) mostra a curva de distribuição de probabilidade normal com os fatores do meta-modelo final usado nesta aplicação (o termo independente não foi incluído). A Fig. (13) mostra as superfícies de resposta para este meta-modelo, no qual os três fatores são descritos. Como antes, as linhas contínuas representam as superfícies de resposta e as duas outras curvas os intervalos de confiança (95% de confiança). Os fatores também estão normalizados no intervalo  $-1$  a  $1$ .

A Tab. (4) ilustra a ANOVA para o meta-modelo final. Novamente, o erro puro é zero porque não houve repetições. A variação explicada pelo modelo é cerca de 78%, isto é, o fenômeno é satisfatoriamente representado por este meta-modelo.

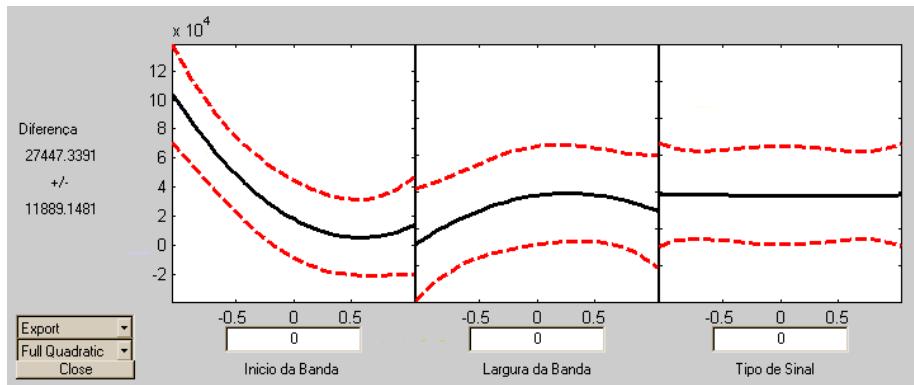


Figura 13. superfícies de resposta para o meta-modelo final

Tabela 4. ANOVA para o meta-modelo final.

ANOVA da regressão

| Fonte de Variação | Soma Quadrática | Nº de gdl | Média Quadrática |
|-------------------|-----------------|-----------|------------------|
| Regressão         | 5.563e+010      | 9         | 6.181e+009       |
| Resíduos          | 1.514e+010      | 29        | 5.22e+008        |
| F. Ajuste         | 1.514e+010      | 29        | 5.22e+008        |
| Erro Puro         | 0               | 0         | 0                |
| Total             | 7.077e+010      | 38        |                  |

% variação explicada: 0.78607

% máxima de variação explicável: 1

Como neste caso o objetivo é obter uma faixa de freqüência melhor para o monitoramento da impedância, 78% pode ser considerado como sendo suficientemente bom para representar o sistema em questão. Pode ser observado que MQR/MQr (11.839502) neste caso é quatro vezes maior que o valor obtido no teste de hipótese F (2.222874).

#### 4. CONCLUSÕES

Observando as superfícies de resposta, é possível dizer que o valor de menor freqüência melhor é o menor possível (15 KHz), enquanto o melhor valor da largura de banda corresponde ao valor intermediário (4 KHz). Finalmente, o tipo do sinal exerce uma pequena influência nos testes, mas entretanto, o sinal do módulo da impedância ( $|Z|$ ), pode ser considerado como o melhor. Conseqüentemente, a configuração melhor de testes corresponde ao teste no. 13 na Fig. (7), seguido pelos testes no. 14 e 15. Isto confirma os resultados obtidos pelas superfícies de resposta para o tipo de sinal usado.

Da mesma forma, as piores condições de teste também podem ser avaliadas pelas superfícies de resposta, como dadas pelos experimentos no. 10, 11 e 12 (veja a Fig. (7)).

O melhor e o pior caso experimental são mostrados nas Figs. (14a e b) respectivamente.  $|Z|$  foi adotado para caracterizar a resposta da impedância para ambos os casos estudados, para fins de comparação.

Das superfícies de resposta é possível otimizar o procedimento de teste. Futuros trabalhos serão dedicados à melhoria das condições de teste para várias intensidades e posições de falha. Desta forma, usando técnicas de otimização por compromisso é possível criar um procedimento de teste robusto para monitoramento de falhas. A metodologia será então utilizada em problemas de monitoramento de falhas em estruturas mais complexas, como as estruturas aeronáuticas por exemplo.

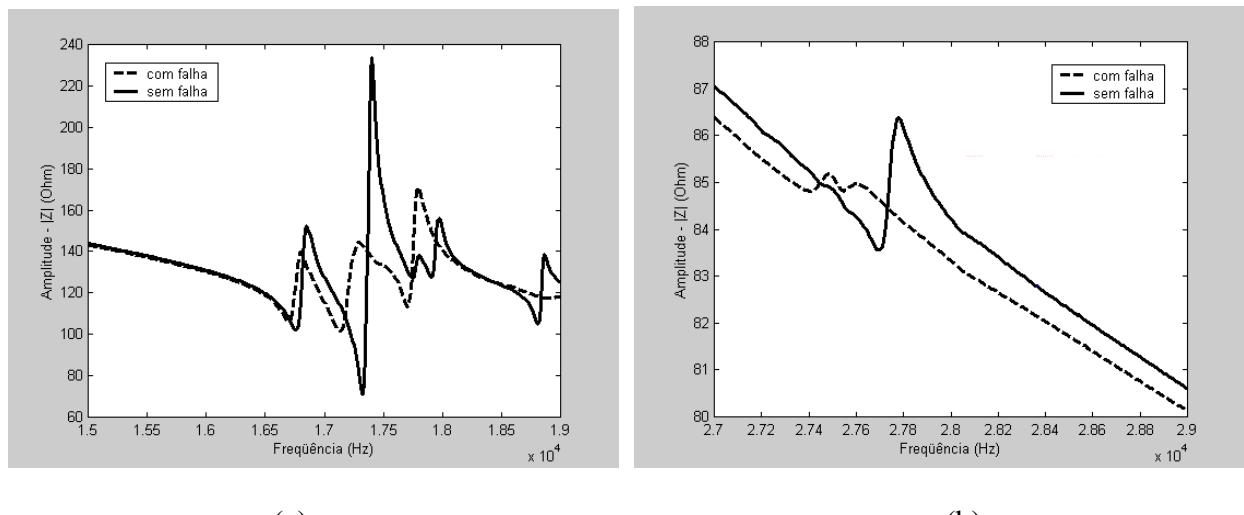


Figure 14. Melhor (número 13) e pior (número 10) experimentos

### 3. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Capes pela bolsa de mestrado. O segundo autor agradece ao CNPq pelo subsídio de pesquisa. Os autores agradecem ao suporte financeiro da FAPEMIG através do projeto TEC 205/02.

### 4. REFERÊNCIAS

- Barros Neto, B.; Scarminio I.S. e Bruns, R.E., 1995, “Planejamento e Otimização de Experimentos”. Editora da Unicamp, Brazil.
- Butkewitsch, S. and Steffen Jr, V., 2002, “Shape Optimization, Model Updating and Empirical Modeling Applied to the Design Synthesis of a Heavy Truck Side Guard”; Int. Journal of Solids and Structures, Vol. 39, pp. 4747-4771, USA.
- Cawley, P., 1984, “The Impedance Method of Non-Destructive Inspection”, NDT International, Vol 17, Nº 2, USA.
- Giurgiutiu, V. and Zagari, A.N., 2002, “Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification”; Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 124, pp. 1-10.
- Montgomery, D.C., 1991, “Design and Analysis of Experiments”, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Moura Jr, J.R.V. and Steffen Jr, V., 2003, “Compromise Optimization and Meta-Modeling for a Flexible 7 DOF Mechanical System Using the Response Surface Method”, accepted for presentation at the 17<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2003, São Paulo-SP, Brazil.
- Raju, V., 1997, “Implementing Impedance-Based Health Monitoring”, MSc dissertation, Virginia Tech, USA.

### 5. DIREITOS AUTORAIS

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

# IMPEDANCE-BASED STRUCTURAL HEALTH MONITORING: A FREQUENCY BANDS EVALUATION

## **Jose dos Reis Vieira de Moura Jr**

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Sta Monica Campus – 38400-902 Uberlandia – MG – Brazil.

jrvmoura@mecanica.ufu.br

## **Valder Steffen Jr**

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Sta Monica Campus – 38400-902 Uberlandia – MG – Brazil.

vsteffen@mecanica.ufu.br

**Abstract.:** *In this work, a technique for the identification of better frequency bands for impedance-based structural damage identification of flexible structures is developed. Impedance-based health monitoring uses small patches of piezoelectric materials (PZT), bonded or embedded in the structure for real time monitoring. The basic principle of this technique is to use high frequencies (approximately above of 20 kHz) to detect superficial changes in the impedance that lead to the internal, imperfections and damage in joints (loosening in welds). The material of electromechanical transducers such as the piezoelectric ones allow conversion from electrical to mechanical impedance. This characteristic facilitates the extraction of mechanical impedance data from the structure by measuring the electric impedance of the system. In the present contribution a PZT sensor is evaluated for damage detection purposes. Factorial designs were then implemented and surface responses were calculated for meta-modeling purposes. Finally, from the surface responses it was possible to determine the behavior of frequency bands changing the factors in the domain evaluated.*

**Keywords:** Impedance-based Structural Health Monitoring, Factorial Design, Smart Structures.