

DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS USANDO FUNÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Silva, J.M.M.[†]; Maia, N.M.M.[†]; Sampaio, R.P.C.^{††}

† - Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex, Portugal

†† - Departamento de Máquinas Marítimas, Escola Náutica Infante D. Henrique
Av. Eng. Bonneville Franco, Paço d' Arcos, 2780 Oeiras, Portugal



SUMÁRIO

Nos últimos anos tem-se vindo a verificar um crescente esforço para desenvolver métodos fiáveis de detecção de danos em estruturas com base no seu comportamento dinâmico. Uma análise exhaustiva da literatura da especialidade mostra que, embora tenham já sido propostos vários métodos, o problema está longe de ser resolvido de forma satisfatória. Neste artigo propõe-se mais um método, de grande simplicidade de aplicação, com vista à localização de danos em elementos estruturais. O método proposto baseia-se na determinação da curvatura de curvas obtidas directamente a partir das funções de resposta em frequência experimentais. Embora tenham sido desenvolvidos no passado recente procedimentos semelhantes, usando a curvatura dos modos de vibração, a técnica que agora se propõe parece mais eficiente e não necessita do recurso à identificação dos modos. No presente artigo apresentam-se ainda alguns exemplos de base teórica e experimental.

1. INTRODUÇÃO

O aparecimento de um dano numa estrutura corresponde à alteração de uma ou mais das suas propriedades físicas nomeadamente da sua rigidez, massa e amortecimento. No caso específico do desenvolvimento e propagação de fendas (o mais comum), pode-se considerar que a massa se mantém inalterada e, em primeira aproximação, que o amortecimento pode ser ignorado. Nestas circunstâncias, é a rigidez estrutural que deve ser tomada em consideração.

O desenvolvimento de uma fenda numa estrutura provoca uma diminuição da sua rigidez e tem, como consequência, impacto sobre o seu comportamento dinâmico. Nestas circunstâncias, uma estrutura danificada terá frequências naturais e modos de vibração diferentes dos da mesma estrutura quando são. A compreensão da relação entre o dano e as consequentes modificações nas propriedades dinâmicas permitirá, em princípio, detectar, localizar e até mesmo prever a severidade do referido dano. O interesse por esta via de análise é patente no número cada vez mais elevado de investigadores que publicam os

resultados do seu trabalho nesta área e justifica-se pela crescente preocupação em monitorar a integridade das estruturas que assumem cada vez maior complexidade.

Uma rápida pesquisa bibliográfica pelos trabalhos publicados no passado mais recente mostra uma grande diversidade de técnicas desenvolvidas com base em análise modal experimental. A título de exemplo: Yuen [1] estudou a relação entre dano e modificações nos valores próprios; Silva e Gomes [2, 3] usaram o conhecimento das modificações das frequências naturais para prever a localização e profundidade de fendas em vigas simples; Srinivasan e Kot [4] estudaram o efeito dos danos na variação dos parâmetros modais de cascas cilíndricas; Richardson e Mannan [5] examinaram e discutiram as diferentes opções na utilização de parâmetros modais obtidos experimentalmente para identificar danos; Zimmerman *et al* [6] recorreram às funções de resposta em frequência para detectar danos através das perturbações ocorridas na matriz de rigidez; Salawu e Williams [7], Jauregui e Farrar [8] e Maia *et al* [9] utilizaram técnicas de ajustamento de modelos (“updating”) com objectivos semelhantes.

Os trabalhos referidos anteriormente mostram existirem vários problemas, ainda não resolvidos de forma satisfatória, associados à utilização da análise modal para detecção de danos estruturais. Podem-se salientar os seguintes:

- reduzida sensibilidade das técnicas ou seja, pequenos danos produzem pequenas modificações nos parâmetros modais;
- os parâmetros modais não podem ser calculados com suficiente precisão devido à inevitável presença de erros nos valores experimentais e a imprecisões dos métodos usados na análise;
- os modelos teóricos, normalmente desenvolvidos com base em técnicas de elementos finitos, podem ser difíceis de obter especialmente no caso de estruturas de grande complexidade cujos modelos chegam facilmente a ter milhares de graus de liberdade;
- danos diferentes podem ser responsáveis por modificações idênticas dos valores dos parâmetros modais. Trata-se de uma consequência de qualquer problema inverso, que é o caso da detecção de danos, em que a solução não é única. Para obter uma solução mais aproximada de uma solução única (e real), torna-se necessário enriquecer os dados do problema através de tanta informação suplementar quanto possível.

A maior parte das técnicas propostas até à data procuram responder, pelo menos, a duas questões básicas: i) existe dano na estrutura?; ii) se existe, onde está localizado? Parte das técnicas em questão baseiam-se na avaliação de modificações nos modos de vibração quando se comparam as estruturas sãs com as estruturas danificadas. As referências [4], [7] e [10-12] são representativas do trabalho efectuado com base nesta metodologia.

Uma alternativa ao método anterior consiste em determinar a curvatura (por derivação) dos modos de vibração [13-15] e comparar os valores antes e depois do dano ocorrer. A ideia de utilizar a curvatura é justificada pelo facto de a segunda derivada do modo de vibração ser muito mais sensível a pequenas perturbações do que o próprio modo.

Qualquer um dos métodos referidos anteriormente tem a desvantagem de necessitar da aplicação, aos resultados experimentais, de um procedimento de identificação modal que se pode tornar computacionalmente pesado quando existem grandes quantidades de resultados. Justificava-se assim procurar encontrar uma metodologia alternativa, embora

seguindo o mesmo conceito de curvatura. A proposta que se apresenta neste artigo considera directamente as funções de resposta em frequência em vez dos modos de vibração. As vantagens óbvias são as seguintes:

- o processo computacional utiliza directamente os dados experimentais, sob a forma de funções de resposta em frequência;
- não se torna necessário recorrer à utilização de qualquer procedimento de identificação modal com vista ao conhecimento dos modos de vibração;
- pode-se utilizar toda a informação contida nas funções de resposta em frequência;
- o método proposto é simples e fácil de aplicar;
- o método proposto permite não só a localização do dano como também a avaliação da sua severidade.

Neste artigo, expõem-se os princípios em que se baseia o método proposto e apresentam-se alguns exemplos de aplicação considerando estruturas simples constituídas por vigas de aço. Discutem-se os resultados obtidos com dados gerados numericamente e com dados experimentais.

2. BASES TEÓRICAS

Com vista a uma melhor compreensão das metodologias, começaremos por apresentar os princípios em que se baseia o método da Curvatura dos Modos de Vibração [13] e só depois se fará a apresentação do método agora proposto. Os princípios teóricos são muito simples em ambos os casos.

2.1 O Método da Curvatura dos Modos de Vibração

Considere-se que se dispõe dos dados experimentais relativos ao comportamento dinâmico de uma estrutura (tanto na situação de sã como na situação de danificada), sob a forma de funções de resposta em frequência. A aplicação, a estes dados experimentais, de qualquer metodologia de identificação modal [16], conduzirá à obtenção dos valores das frequências naturais ω e ω_d e dos modos de vibração $\{\phi\}$ e $\{\phi_d\}$. O índice d é aqui utilizado para representar a situação em que existe dano.

Tanto no caso da estrutura sã como no caso da estrutura danificada, a curvatura de cada modo de vibração num determinado ponto i da estrutura, pode ser determinada através de uma técnica numérica de diferenças centrais:

$$\phi_i'' = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{h^2} \quad (1)$$

onde h é a distância entre os pontos i+1 e i-1.

A localização do dano pode ser efectuada considerando separadamente cada modo de vibração e calculando o valor absoluto da diferença entre as curvaturas do modo para a estrutura sã e para a estrutura danificada:

$$\{\Delta\phi''\} = \left| \{\phi_d''\} - \{\phi''\} \right| \quad (2)$$

A diferença anterior será nula se não existir dano e terá valores diferentes de zero se existir. Estes valores serão mais elevados próximo da zona danificada. A severidade do dano será tanto maior quanto maior for essa diferença.

2.2 Método da Curvatura das Funções de Resposta em Frequência

Considere-se agora que dispomos de uma colecção de funções de resposta em frequência $\alpha_{jk}(\omega)$ representando a razão entre a resposta dinâmica num determinado ponto j e a força perturbadora aplicada num ponto k .

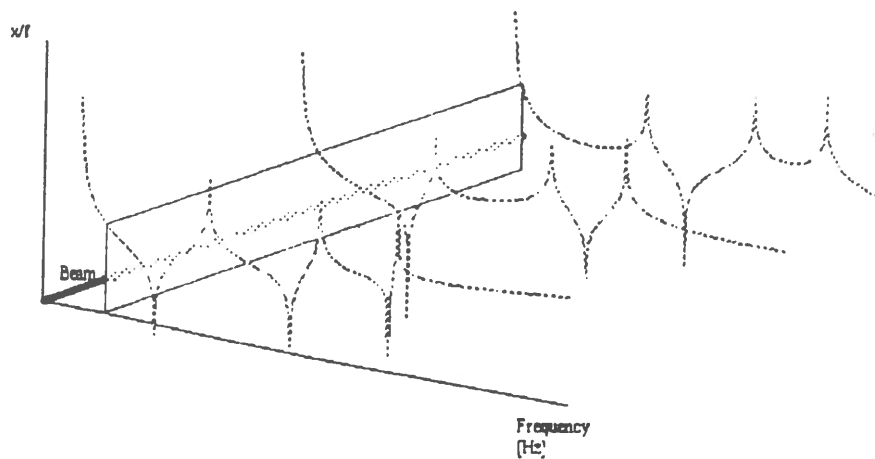


Figura 1 - Representação esquemática da definição das curvas utilizadas na análise.

Se considerarmos os valores de $\alpha_{jk}(\omega)$ em todos os pontos j da estrutura para um determinado valor da frequência ω , obteremos uma curva (figura 1) que nos dá uma indicação da forma como a estrutura se está a deformar durante o processo vibratório, a essa frequência. Para qualquer valor ω da frequência, pode-se portanto calcular a curvatura desta nova curva através da expressão

$$\alpha''_{jk}(\omega) = \frac{\alpha_{(j+1)k}(\omega) - 2\alpha_{jk}(\omega) + \alpha_{(j-1)k}(\omega)}{h^2} \quad (3)$$

Seguindo o mesmo procedimento que o método da curvatura dos modos de vibração, a localização (e a severidade) de um dano poderá ser determinada através do cálculo do valor absoluto da diferença de curvaturas entre os casos de estrutura sã e de estrutura danificada:

$$\{\Delta\alpha''(\omega)\}_k = \left| \{\alpha''_d(\omega)\}_k - \{\alpha''(\omega)\}_k \right| \quad (4)$$

No presente caso dispomos de mais informação. Com efeito, a equação (4) corresponde à utilização de valores de curvatura baseados em valores das funções de resposta em

frequência a uma determinada frequência ω e para uma perturbação aplicada num dado ponto k . Poderemos pois incluir a informação (enfatizando assim o efeito do dano) de toda a gama disponível de frequências considerando o somatório

$$\{\Delta\alpha''\}_k = \sum_{\omega} \left| \{\alpha''_d(\omega)\}_k - \{\alpha''(\omega)\}_k \right| \quad (5)$$

Finalmente, se se tiver procedido a medições para diferentes localizações k da força perturbadora o cálculo das diferenças pode também incluir esta informação adicional:

$$\{\Delta\alpha''\} = \sum_k \sum_{\omega} \left| \{\alpha''_d(\omega)\}_k - \{\alpha''(\omega)\}_k \right| \quad (6)$$

A vantagem de considerar os somatórios em (5) ou em (6) resulta do facto de se se considerar apenas uma frequência e um ponto de aplicação da força perturbadora se poder estar numa situação em que a influência do dano no comportamento dinâmico é reduzida. Ao se considerarem todas as frequências da análise experimental e todos os casos de aplicação de força perturbadora garante-se a utilização de valores correspondentes a situações em que o dano afecta de forma mais substancial o comportamento dinâmico. A existir um dano ele será certamente detectado.

3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Nos exemplos de aplicação que se apresentam a seguir, considerou-se uma estrutura muito simples constituída por uma viga de aço de secção rectangular, livre no espaço, vibrando em flexão. Começaremos por utilizar valores experimentais simulados numericamente usando técnicas de elementos finitos. Posteriormente far-se-á a aplicação a casos reais.

3.1 Exemplos Simulados Numericamente

Para simulação dos dados considerou-se a viga discretizada em 20 elementos de igual comprimento (com 4 graus de liberdade cada). Parte-se do princípio de que se desconhecem a localização e as características da zona danificada. O dano foi simulado através da redução da rigidez de um dos elementos (reduzindo o valor do módulo de elasticidade). Desprezou-se ainda o amortecimento.

Decidiu-se começar por ilustrar o método da curvatura dos modos de vibração a fim de comparar os resultados com o método agora proposto. Neste primeiro exemplo introduziu-se uma redução de 50% do módulo de Young do elemento número 7 (entre os nós 7 e 8). Na figura 2 mostram-se (em sobreposição) as curvaturas do primeiro modo de vibração das vigas sã e fendida, sendo imediatamente evidente a existência de dano na localização correcta. Calculando a diferença entre as curvaturas, os resultados tornam-se bastante mais claros como se mostra na figura 3.

Nas figuras 4 e 5 efectua-se a mesma análise mas considerando o terceiro modo de vibração. Neste caso verifica-se que as curvaturas dos modos, por si só, não permitem uma clara visualização da zona danificada. No entanto, se se considerarem as diferenças de curvatura já se torna mais nítida a existência de dano.

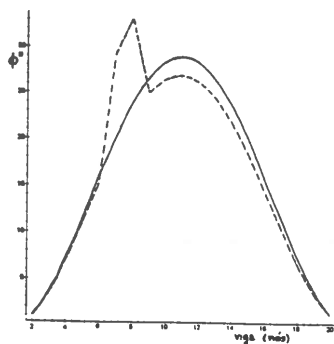


Figura 2 - Curvaturas do primeiro modo de vibração para as vigas sã e danificada (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7).

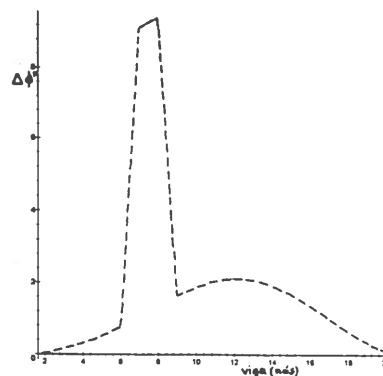


Figura 3 - Diferenças de curvatura do primeiro modo de vibração, entre a viga sã e a viga danificada (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7).

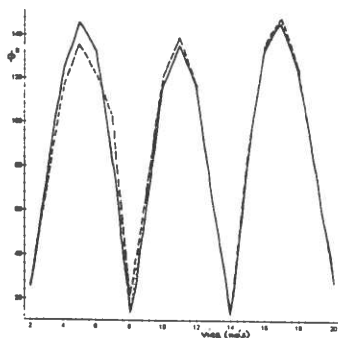


Figura 4 - Curvaturas do terceiro modo de vibração para as vigas sã e danificada (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7).

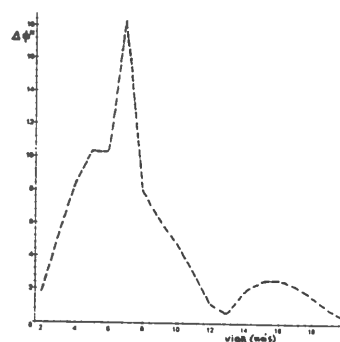


Figura 5 - Diferenças de curvatura do terceiro modo de vibração, entre a viga sã e a viga danificada (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7).

O exemplo anterior foi seguidamente repetido aplicando o método da curvatura das funções de resposta em frequência. As funções de resposta em frequência foram calculadas sem ruído e considerando cinco casos distintos de aplicação de forças perturbadoras (nos nós 1, 6, 11, 16 e 21). As diferenças nas curvaturas das FRFs, obtidas com base na expressão (5) estão representadas na figura 6, para os cinco casos de força perturbadora.

Como se pode verificar, esta metodologia dá uma indicação clara da localização do dano embora se observem ainda valores não desprezáveis das diferenças fora da zona danificada. A influência da posição do ponto de aplicação da força perturbadora parece não ser significativa. A fim de tentar dar maior ênfase à zona danificada, procedeu-se ao cálculo da derivada das curvas da figura 6 obtendo-se os resultados apresentados na figura 7. De facto

a zona danificada é agora mais claramente indicada embora com menor precisão (surge mais larga, sugerindo que o dano se encontra entre os pontos 6 e 9) devido ao facto de serem necessários mais pontos para o cálculo das derivadas.

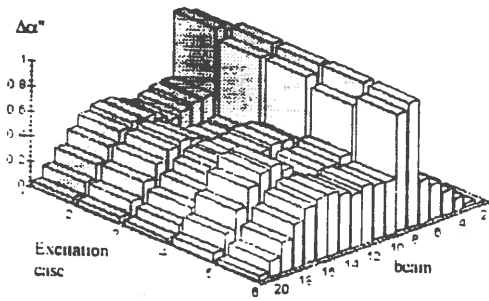


Figura 6 - Diferenças nas curvaturas das FRFs, para os cinco casos distintos de localização da força perturbadora (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7 e dados simulados sem ruído).

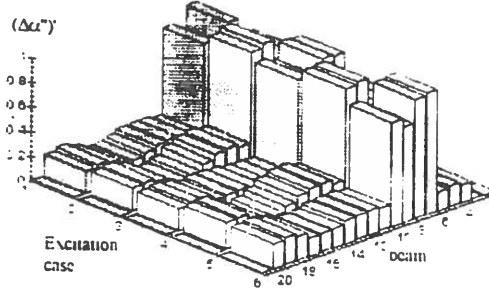


Figura 7 - Derivadas das diferenças nas curvaturas das FRFs apresentadas na figura 6 (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7 e dados simulados sem ruído).

Em face dos resultados anteriores, voltou a utilizar-se o mesmo exemplo mas, desta vez, introduzindo ruído aleatório nos dados simulados ($\pm 5\%$). A aplicação do método proposto conduziu à obtenção dos resultados apresentados nas figuras 7 e 8.

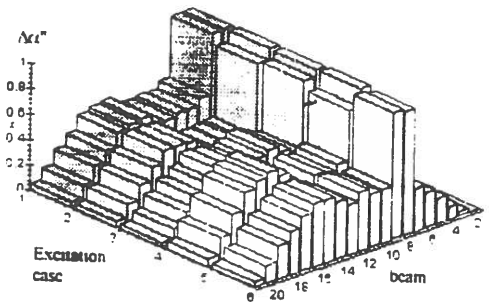


Figura 7 - Diferenças nas curvaturas das FRFs, para os cinco casos distintos de localização da força perturbadora (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7 e dados simulados com $\pm 5\%$ de ruído).

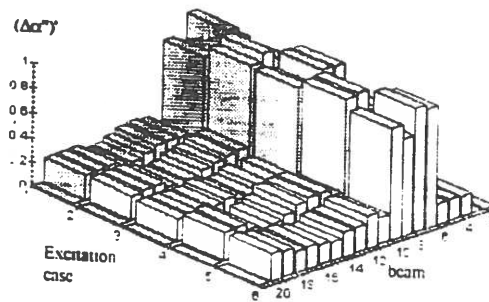


Figura 8 - Derivadas das diferenças nas curvaturas das FRFs apresentadas na figura 7 (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 7 e dados simulados com $\pm 5\%$ de ruído).

Para reforço das conclusões, os exemplos numéricos foram estendidos a mais duas situações, com a mesma percentagem de ruído nos dados: i) considerando o dano entre os pontos 11 e 12; e ii) considerando apenas 25% de redução do módulo de Young do elemento entre os pontos 7 e 8. Os resultados obtidos confirmaram o previsto e são apresentados nas figuras 9 e 10.

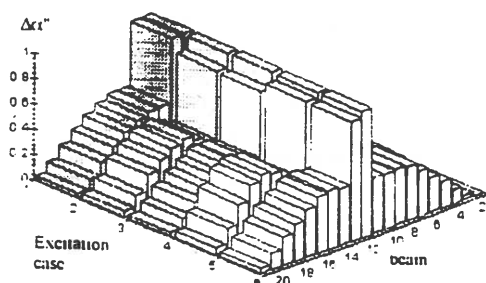


Figura 9 - Diferenças nas curvaturas das FRFs, para os cinco casos distintos de localização da força perturbadora (dano simulado por uma redução em 50% do módulo de elasticidade do elemento 11 e dados simulados com $\pm 5\%$ de ruído).

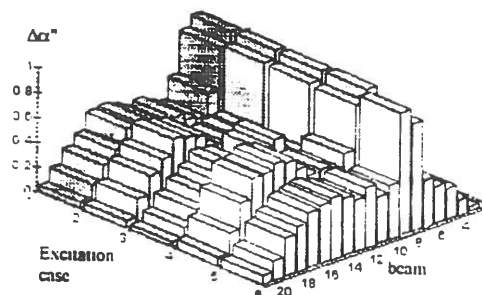


Figura 10 - Diferenças nas curvaturas das FRFs, para os cinco casos distintos de localização da força perturbadora (dano simulado por uma redução em 25% do módulo de elasticidade do elemento 7 e dados simulados com $\pm 5\%$ de ruído).

3.1 Exemplos Experimentais

Sendo os resultados obtidos com base em simulações numéricas tão promissores, foi decidido implementar o método proposto em dois casos experimentais simples. Para o efeito consideraram-se duas vigas de aço (EPC 95 MN 28 k) com secção rectangular (20x10 mm), sendo uma de 1000 mm de comprimento e a outra de 455 mm. As vigas foram ainda carregadas com pequenas massas concentradas em determinados pontos ao longo do seu comprimento. Para efeitos de análise, considerou-se que a viga de 1000 mm de comprimento se poderia considerar como constituída por 21 elementos de igual comprimento (ou seja, com 22 nós) e a viga de 455 mm de comprimento como constituída por 9 elementos também de igual comprimento (ou seja com 10 nós).

A primeira viga, a que chamaremos provete X, foi carregada com um total de 22 massas concentradas (de 20 g cada), coladas em todos os nós. A força perturbadora foi aplicada no nó 1 onde se colou uma massa adicional de 20 g (ou seja, o nó 1 possuía uma massa adicional de 40 g). A viga foi sujeita a análise experimental na sua condição inicial de viga sã e, posteriormente, a nova análise experimental após se ter aberto uma ranhura (simulando uma fenda) entre os nós 5 e 6.

Quanto à segunda viga, a que chamaremos provete Y, foi carregada com um total de 10 massas concentradas (de 20 g cada), coladas em todos os nós. A força perturbadora foi

também aplicada no nó 1 onde se colou uma massa adicional de 20 g (ou seja, o nó 1 possuía uma massa adicional de 40 g). De igual forma, a viga foi sujeita a análise experimental na sua condição inicial de viga sã e, posteriormente, a nova análise experimental após se ter aberto uma ranhura (simulando uma fenda) entre os nós 5 e 6.

Cada um dos provetes foi ainda analisado considerando dois casos diferentes de profundidade de fenda (40% e 80% da espessura da viga). A análise experimental foi efectuada com base num sistema e técnicas de medição de mobilidade (figura 11) utilizando um vibrador electromagnético e perturbação aleatória. Em todos os casos foi considerada vibração em flexão, simulando-se condições de vigas livres no espaço através de suspensões flexíveis. Foram tomadas apenas em consideração respostas em translação.

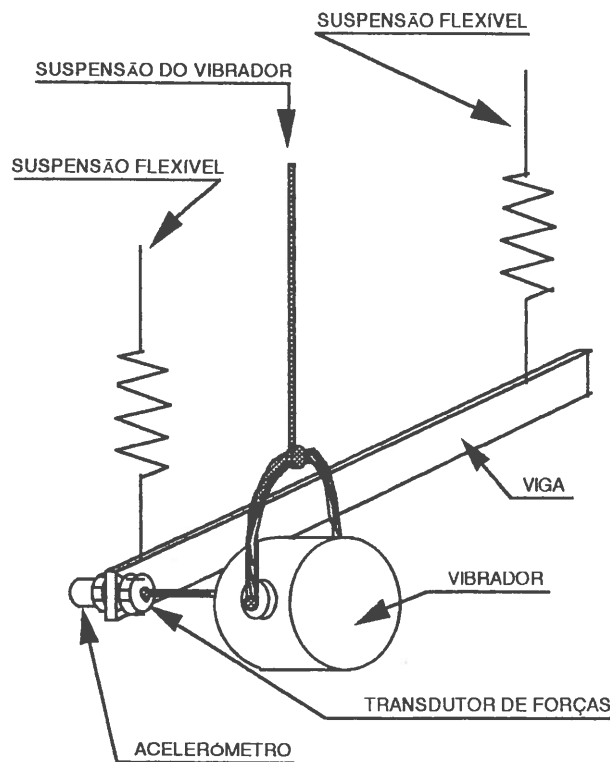


Figura 11 - Esquema da montagem experimental para medição das funções de resposta em frequência.

Os resultados obtidos com a aplicação do método proposto aos dados experimentais para os provetes X e Y são apresentados nas figuras 12 e 13 respectivamente, onde as diferenças $\{\Delta\alpha\}_1$ são apresentadas versus o número do nó (ou número da correspondente coordenada de translação). No caso do provete X, pode observar-se que as maiores diferenças ocorrem entre as coordenadas 5 e 6 onde, de facto, a fenda se encontrava localizada. Esta localização não é tão óbvia no caso em que a profundidade da fenda tinha 40 % da espessura da viga (ou seja, 4 mm de profundidade), sendo, no entanto claro que, como esperado, as diferenças são maiores para maiores profundidades de fenda.

Tomando agora em consideração os resultados obtidos no caso do provete Y (note-se que as escalas das figuras 12 e 13 são diferentes), verifica-se uma menor precisão. No caso da fenda com 80% de profundidade é evidente a sua localização entre os nós 5 e 6. No

entanto, no caso da fenda com 40% de profundidade os resultados não são tão bons uma vez que parecem indicar que a fenda pode estar não só entre os nós 5 e 6 mas também entre os nós 8 e 9.

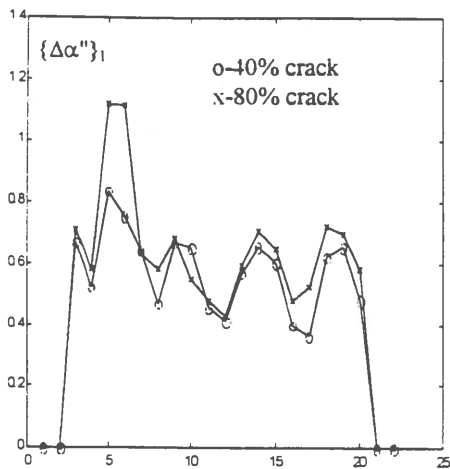


Figura 12 - Soma das diferenças de curvatura, ao longo das frequências e das coordenadas, no caso do provete experimental X.

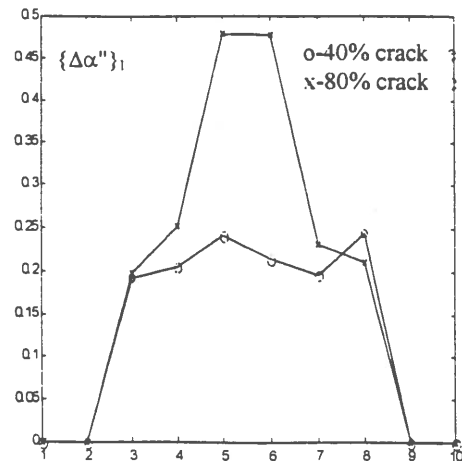


Figura 13 - Soma das diferenças de curvatura, ao longo das frequências e das coordenadas, no caso do provete experimental Y.

4. CONCLUSÕES

O método proposto, de localização de danos estruturais a partir das funções de resposta em frequência, conduziu à obtenção de resultados que se podem considerar satisfatórios quando aplicados a estruturas simples. Pode-se concluir que a técnica é promissora, embora se verifiquem ainda dificuldades que se espera possam vir a ser ultrapassadas após maior aprofundamento. Julga-se ser de prosseguir este trabalho com vista a determinar as suas possíveis aplicações, limites e capacidade de detecção e quantificação de danos estruturais.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Yuen, M. M. F., "A Numerical Study of the Eigenparameters of a Damped Cantilever", *Journal of Sound and Vibration*, 103(3), 1985, pp. 301-310.
- [2] Silva, J. M. M. e Gomes, A. J. A., "Crack Identification of Simple Structural Elements Through the Use of Natural Frequency Variations: The Inverse Problem", *Proc of IMAC 12*, Vol. 2, 1994, pp. 1728-1735.
- [3] Silva, J. M. M. e Gomes, A. J. A., "The Inverse Crack Identification Problem: Extension to Two Simultaneous Cracks on Free-Free Beams", in *Recent Advances in Experimental Mechanics*, Vol. 2, pp. 1113-1119, ed. Silva Gomes et al, 1994, A. A. Balkema Publishers.

- [4] Srinivasan, M. G. e Kot, C. A., "Effect of Damage on the Modal Parameters of a Cylindrical Shell", Proc. of IMAC 10, Vol. 1, 1992, pp. 529-535.
- [5] Richardson, M. H. e Mannan, M. A., "Correlating Minute Structural Faults with Changes in Modal Parameters", Proc. of IMAC 11, Vol. 2, 1993, pp. 893-898.
- [6] Zimmerman, D. C., Simmermacher, T. e Kaouk, M., "Structural Damage Detection Using Frequency Response Functions", Proc. of IMAC 13, Vol. 1, 1995, pp. 179-184.
- [7] Salawu, O. S. e Williams, C., "Structural Damage Detection Using Experimental Modal Analysis - A Comparison of Some Methods", Proc. of IMAC 11, Vol. 1, 1993, pp. 254-260.
- [8] Jauregui, D. V. e Farrar, C. R., "Comparison of Identification Algorithms on Experimental Modal Data from a Bridge", Proc. of IMAC 14, Vol. 2, 1996, pp. 1423-1429.
- [9] Maia, N. M. M., Reynier, M. e Ladevèze, P., "Error Localization for Updating Finite Element Models Using Frequency-Response-Functions", Proc. of IMAC 12, Vol. 2, 1994, pp. 1299-1308.
- [10] Fox, C. H. J., "The Location of Defects in Structures: A comparison of the Use of Natural Frequency and Mode Shape Data", Proc. of IMAC 10, Vol. 1, 1992, pp. 522-528.
- [11] Ko, J. M., Wong, C. W. e Lam, H. F., "Damage Detection in Steel Framed Structures by Vibration Measurement Approach", Proc. of IMAC 12, Vol. 1, 1994, pp. 280-286.
- [12] Lam, H. F., Ko, J. M. e Wong, C. W., "Detection of Damage Location Based on Sensitivity Analysis", Proc. of IMAC 13, Vol. 2, 1995, pp. 1499-1505.
- [13] Pandey, A. K., Biswas, M. e Samman, M. M., "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes", Journal of Sound and Vibration, 145(2), 1991, pp. 321-332.
- [14] Zhang, Z. e Atkan, A. E., "The Damage Indices for Constructed Facilities", Proc. of IMAC 13, Vol. 2, 1995, pp. 1520-1529.
- [15] Robinson, N. A., Peterson, L. D., James, G. H. e Doebling, S. W., "Damage Detection in Aircraft Structures Using Dynamically Measured Static Flexibility Matrices", Proc. of IMAC 14, Vol. 1, 1996, pp. 857-865.
- [16] Maia, N. M. M. e Silva, J. M. M. ed., "Theoretical and Experimental Modal Analysis", Capítulo 4, Research Studies Press, Reino Unido, 1ª edição, Março de 1997.

