

# MONITORAÇÃO DE DEFEITOS UTILIZANDO SENSORES E ATUADORES PIEZELÉTRICOS

## **Antonio Lopes Gama**

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica  
24210-000, Niterói, RJ, Brasil. E-mail: agama@mec.uff.br

## **Sérgio R. K. Morikawa**

## **Arthur M. B. Braga**

PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica  
22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: abraga@mec.puc-rio.br

## **Resumo**

Apresenta-se um método para monitoração de defeitos superficiais em estruturas utilizando sensores e atuadores piezelétricos. O método consiste em excitar a estrutura com atuadores e analisar a resposta de sensores piezelétricos instalados próximos de falhas ou defeitos. Variações significativas no sinal do sensor são observadas a medida em que os defeitos ou falhas superficiais se propagam. Simulações e experimentos com vigas e estruturas contendo trincas de fadiga ou entalhes foram realizados. Os resultados mostram que a escolha de parâmetros adequados, como o comprimento do sensor e sua posição em relação ao defeito, permite que variações muito pequenas na profundidade de trincas superficiais ou entalhes sejam detectados.

**Palavras-chave:** estruturas inteligentes, integridade estrutural, materiais piezelétricos

## **1. INTRODUÇÃO**

O desempenho, versatilidade e baixo custo das cerâmicas e polímeros piezelétricos, tem motivado novas e inúmeras aplicações relacionadas com a monitoração da integridade estrutural (Monkhouse *et al* , 1998, Badcock & Birt, 1998 e Lin & Chang, 1999). Estas aplicações geralmente estão associadas com o conceito de estruturas inteligentes, onde sensores e atuadores integrados à estrutura, juntamente com uma unidade de controle, podem realizar inspeções não destrutivas. Os elementos piezoelétricos podem ser conformados de várias maneiras, operar de forma quase pontual ou distribuída, na superfície ou no interior de estruturas, tanto como sensores quanto como atuadores. Estas qualidades aliadas principalmente a alta sensibilidade dos sensores piezelétricos, foram exploradas neste trabalho para o desenvolvimento de um sistema de monitoração do crescimento de defeitos superficiais. Basicamente, o método consiste em excitar a estrutura danificada com atuadores piezelétricos, colados em sua superfície, e monitorar o crescimento de defeitos através da resposta elétrica de sensores instalados próximos aos defeitos. O que permite detectar o crescimento de falhas superficiais são as alterações do campo de deformações em sua vizinhança, a medida em que os defeitos se propagam. Por exemplo, com o aprofundamento

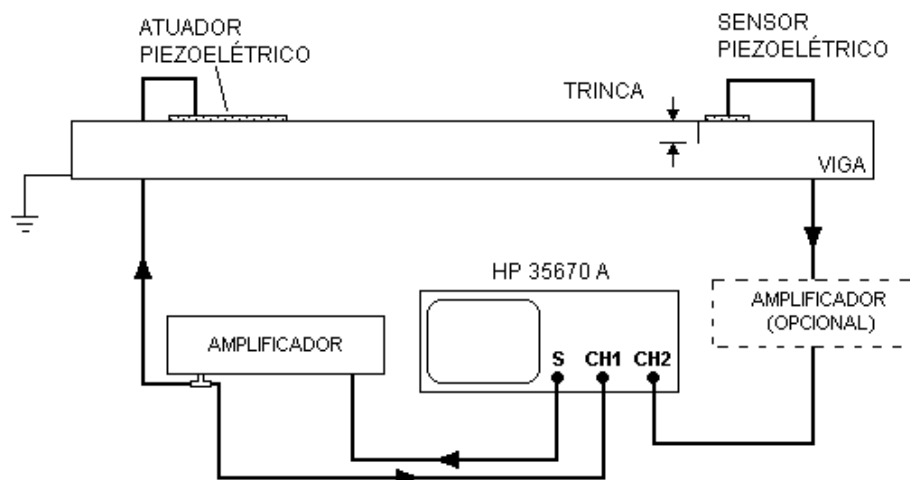
de uma trinca, as deformações produzidas pelo atuador piezoeletrico na região superficial próxima da trinca vão diminuindo gradualmente. Desta forma, o sensor piezoeletrico posicionado neste local, gera sinais elétricos de intensidade cada vez menor. A escolha de parâmetros adequados, como o comprimento do sensor e sua posição em relação ao defeito, permite que variações muito pequenas de seu tamanho sejam detectados.

Extensômetros de resistência elétrica também colados próximo a trincas, foram utilizados por Verreman (1994) e Otegui *et al.* (1991), para monitoração de trincas de fadiga em ensaios de juntas soldadas. Os autores relatam que utilizando extensômetros de pequenas dimensões, foram capazes de perceber variações muito pequenas (da ordem de 20  $\mu\text{m}$ ) no comprimento de trincas. A excelente capacidade para percepção na variação do comprimento de trincas superficiais encontrada por Verreman (1994) e Otegui *et al.* (1991) utilizando extensômetros de resistência elétrica, também foram verificadas ao se utilizar sensores piezoeletricos colados próximos a trinca. Os extensômetros de resistência elétrica entretanto, não são tão sensíveis como os sensores piezoeletricos e desta forma requerem atuadores mais potentes, capazes de produzir níveis de deformação mais elevados do que os geralmente produzidos por atuadores piezoeletricos.

Distintamente dos sistemas tradicionais para monitoração do crescimento de trincas, no método apresentado neste trabalho a excitação e monitoração da estrutura é realizada por elementos piezoeletricos, que podem fazer parte da própria estrutura. Para avaliar a eficiência deste método, realizou-se experimentos com vigas de aço e alumínio onde foram introduzidas trincas de fadiga e entalhes através de usinagem. Simulações numéricas utilizando um método baseado na Teoria de Reddy (Braga *et al.*, 1998, e Gama, 1998) e o método de elementos finitos, também foram empregados para verificação desta metodologia. Ao final, esta técnica foi aplicada a estruturas de maior complexidade, onde foram realizados experimentos para monitorar o crescimento de defeitos em uma treliça.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, a eficiência do método para monitoração da propagação de defeitos superficiais foi verificada através de experimentos com vigas de alumínio e vigas de aço. Conforme mostra esquematicamente a Figura 1, cada viga foi instrumentada com um atuador e um sensor cerâmico piezoeletrico modelo APC 855, fornecidos pela *American Piezo Ceramics, Inc.*, cujas características podem ser observadas na Tabela 1.



**Figura 1.** Experimento para monitoração do crescimento de uma trinca.

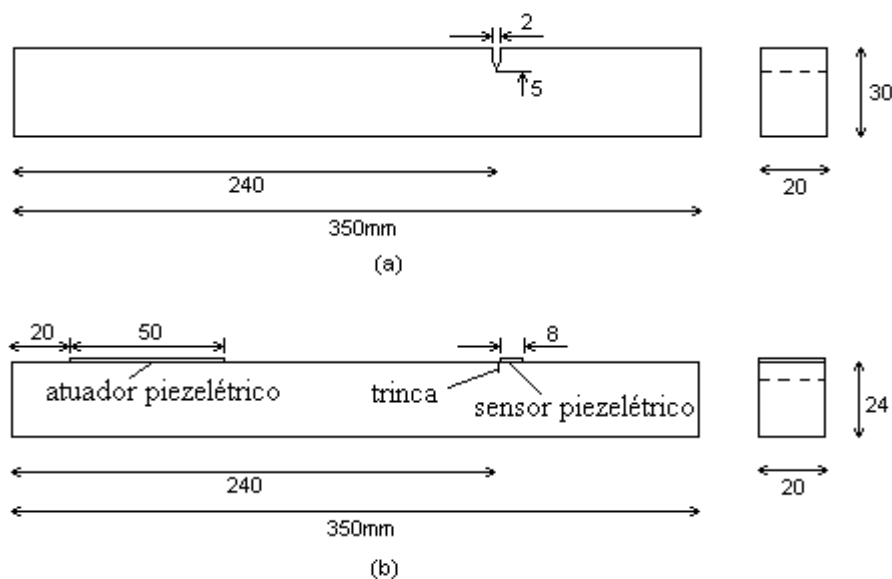
As dimensões do atuador e do sensor foram inicialmente estimadas através da análise por elementos finitos e também pelo método analítico-numérico baseado na teoria discreta de Reddy (Braga *et al.*, 1998, Gama, 1998,), conforme discutido na próxima seção. O procedimento experimental tem início com a determinação da função de resposta em frequência (FRF) da viga isenta de defeitos ou com um defeito em estágio inicial. A viga foi suspensa por dois fios flexíveis para reproduzir a condição de apoio livre-livre. Esta primeira FRF será utilizada como referência para comparações com FRFs da viga contendo defeitos. Para obter a FRF, a fonte de um analisador espectral HP 35670A e um amplificador são utilizados para gerar um sinal elétrico do tipo ruído branco, em várias faixas de frequência compreendidas entre 0 e 52 KHz. Este sinal é enviado ao atuador piezolétrico para excitar a viga. O sinal gerado pelo sensor piezolétrico devido a excitação produzida pelo atuador é conduzido ao analisador espectral. Note na Figura 1, que este sinal também pode ser enviado diretamente ao analisador. Tendo-se como entrada o sinal enviado para o atuador e como resposta o sinal gerado pelo sensor, determina-se a FRF. A FRF que será utilizada como referência para o estado inicial da viga, será uma média de várias funções de resposta em frequência, usualmente vinte.

**Tabela 1.** Propriedades da cerâmica piezolétrica APC 855

Módulo de Young (Gpa)	Coeficiente de Poisson	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Constantes piezolétricas (10 <sup>-12</sup> m/V)		Constante dielétrica
			d <sub>31</sub>	d <sub>33</sub>	
60	0,3	7500	-270	590	3250

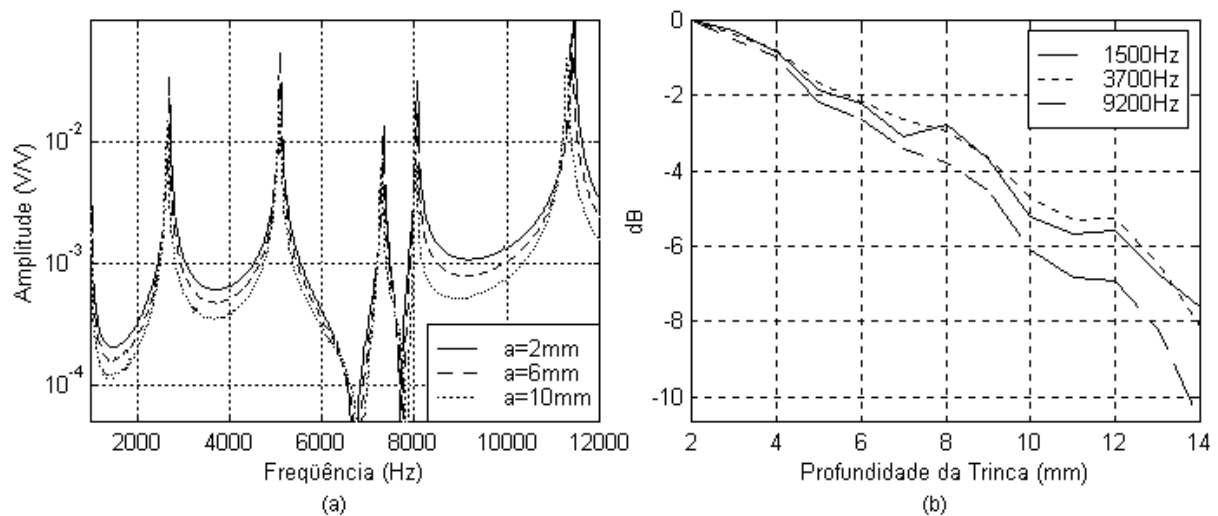
As análises iniciais foram realizadas simulando-se defeitos introduzidos através de usinagem em vigas de alumínio. Estes resultados preliminares revelaram uma excelente sensibilidade para percepção do crescimento de entalhes superficiais.

Nos experimentos posteriores, verificou-se o desempenho desta técnica na monitoração do crescimento de trincas de fadiga. Em vigas de aço SAE 1045, foram introduzidas trincas de fadiga, sensores e atuadores piezolétricos, conforme o procedimento descrito na Figura 2.



**Figura 2.** Preparação de corpos de prova para ensaios de monitoração do crescimento de trincas de fadiga com atuadores e sensores piezolétricos.

Inicialmente, usou-se um entalhe na seção da viga onde se deseja nuclear a trinca (Figura 2(a)). Em seguida, uma trinca de aproximadamente 3 mm é produzida na raiz do entalhe através de ensaio de fadiga por flexão, em uma máquina de ensaios INSTRON. A viga é então usinada e sua espessura é reduzida gradualmente, a partir da superfície com o entalhe, até que este seja completamente eliminado. Após esta operação um atuador e posteriormente um sensor piezelétrico são colados próximo à trinca (Figura 2(b)), de forma que sua borda fique a uma distância de aproximadamente 0,5 mm da trinca. O procedimento a seguir é semelhante ao que foi descrito anteriormente, ou seja, primeiramente determina-se a FRF que será utilizada como referência para verificação do crescimento da trinca. Neste caso a viga já possui uma trinca cuja profundidade é de cerca de 2mm. Em seguida, a viga instrumentada é reconduzida a máquina de ensaios INSTRON onde o tamanho da trinca é aumentado de 0,5 em 0,5 mm, e a cada incremento da trinca, uma nova FRF é medida. Os resultados para uma das vigas é reproduzido na Figura 3.



**Figura 3.** FRF para diferentes tamanhos de trinca (a). Redução em dB na amplitude da FRF em algumas frequências selecionadas (b).

Nota-se na Figura 3(a), uma redução de amplitude da FRF ao longo de quase toda a faixa de frequência, a medida em que o entalhe é aprofundado, apesar do sensor utilizado possuir um comprimento de 8 mm, considerado grande. A redução de amplitude se deve a queda do sinal elétrico no sensor piezelétrico, devido a diminuição dos níveis de deformação na região próxima a borda da trinca a medida em que seu tamanho aumenta. Quatro vigas foram ensaiadas desta forma, e em todos os ensaios verificou-se a eficiência do método. Outras conclusões importantes foram obtidas através destes ensaios. A repetibilidade de resultados foi verificada ao realizar-se ensaios sob condições idênticas. Verificou-se também que o sinal do sensor piezelétrico manteve-se perfeitamente estável apesar de submetido, em alguns casos, a até 500 000 ciclos sob deformações da ordem de  $800 \mu\text{m/m}$ .

Pretende-se entretanto, implementar uma técnica mais simples para a monitoração do crescimento de falhas superficiais, que não dependa continuamente de equipamentos caros e sofisticados. O método consiste em excitar a estrutura em uma única frequência e verificar a propagação de defeitos através do comportamento do sinal do sensor piezelétrico. A FRF permite avaliar as faixas de frequência mais adequadas para excitar a estrutura. Através dos resultados concluiu-se que faixas de frequência distantes das frequências de ressonância, que apresentam níveis de sinais do sensor adequados e que não variam rapidamente com a frequência, são as mais indicadas. Na Figura 3(a), foram escolhidas algumas frequências onde a queda de amplitude da FRF foi relacionada com a profundidade do entalhe na Figura

3(b). O valor em dB é calculado tendo-se como referência a amplitude da FRF da viga com o defeito inicial ( $A_r$ ):

$$dB = 20 \log(A/A_r) \quad (1)$$

onde  $A$  é a amplitude da FRF da viga com diferentes tamanhos de trinca.

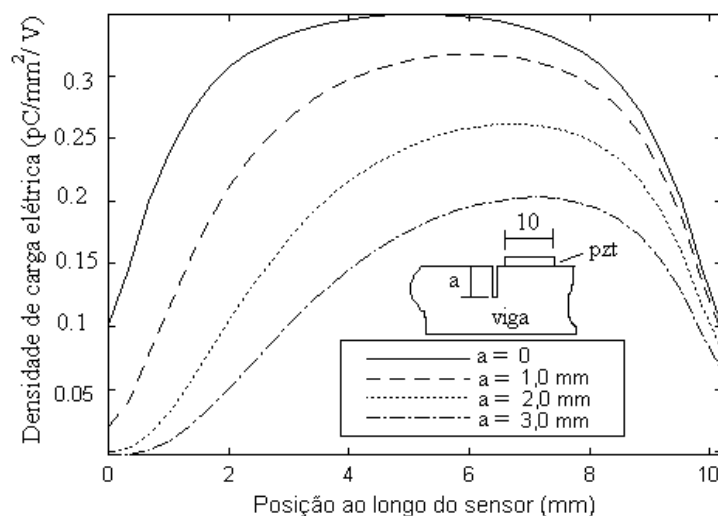
Na Figura 3(b), constata-se uma redução acentuada do sinal do sensor com o crescimento do entalhe. Quedas no sinal do sensor bem maiores foram observadas ao se utilizar sensores de menor comprimento. Outro ponto fundamental, é que a redução em dB da amplitude da FRF não varia muito com a frequência.

As dimensões e a localização do sensor em relação ao entalhe, são parâmetros fundamentais para o êxito deste procedimento. Estes devem ser escolhidos tendo-se em vista os objetivos do processo de monitoração, ou seja, um sensor de pequenas dimensões posicionado próximo a trinca, permite a determinação de pequenas variações em seu tamanho, entretanto fica limitado ao acompanhamento de pequenas profundidades. Já um sensor de maiores dimensões é menos sensível às variações de tamanho do defeito, mas pode monitorar o crescimento de defeitos mais profundos.

### 3. ANÁLISE POR SIMULAÇÃO

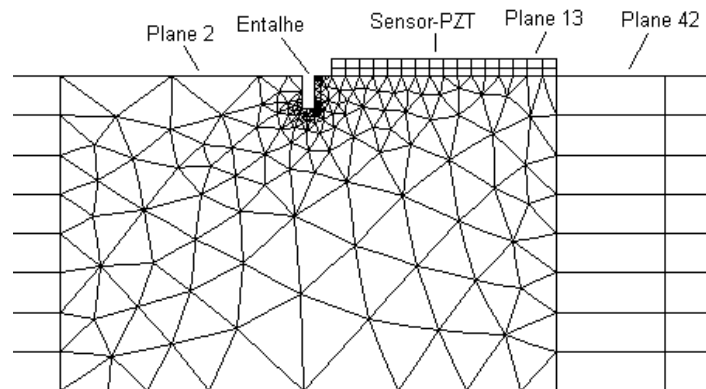
As análises numéricas, tiveram como objetivo estabelecer as condições iniciais para os experimentos e auxiliar na avaliação do desempenho do método de monitoração da propagação de trincas. Foram realizadas análises por elementos finitos utilizando o programa ANSYS, e através de um método analítico-numérico baseado na teoria discreta de Reddy (Braga *et al.*, 1998 e Gama, 1998).

Os primeiros estudos sobre a relação entre as variações do campo de deformações nas proximidades do entalhe, com a resposta elétrica de sensores piezelétricos, foram realizadas através de um método analítico-numérico baseado na teoria de Reddy (Braga *et al.*, 1998, Gama, 1998). Conforme mostra a Figura 4, verificou-se que a distribuição da carga elétrica ao longo do comprimento do sensor, posicionado próximo ao entalhe, decresce com o aprofundamento do entalhe. Esta redução na distribuição da carga elétrica está relacionada com a redução nos níveis de deformação na superfície próxima a borda do defeito, devido ao seu aprofundamento (Verreman, 1994).



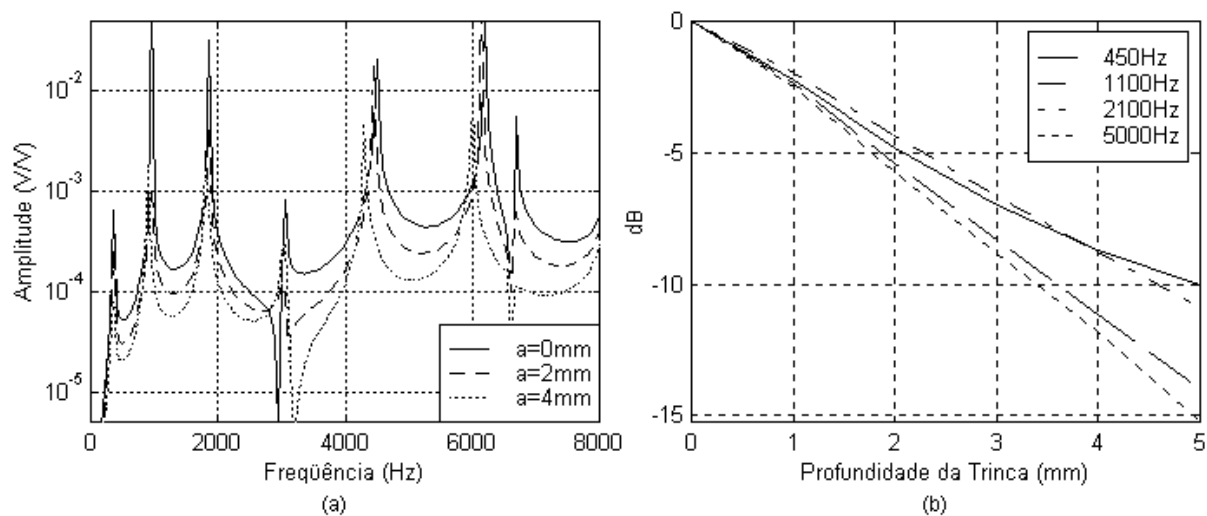
**Figura 4.** Variação da distribuição de carga elétrica no sensor piezelétrico.

Nas análises por elementos finitos, buscou-se reproduzir as condições dos experimentos com vigas de aço e alumínio contendo trincas de fadiga ou entalhes. Os casos analisados foram idênticos aos experimentos descritos na seção anterior, ou seja, uma viga excitada por um atuador e monitorada por um sensor piezolétrico instalado próximo a um entalhe ou trinca superficial. A Figura 5, mostra parte da malha de elementos finitos utilizada na modelagem de uma viga de alumínio contendo um entalhe. Três tipos diferentes de elementos foram empregados na modelagem da viga. O elemento *PLANE 13*, foi utilizado na modelagem das cerâmicas piezolétricas. Este elemento é um elemento quadrilátero de quatro nós e permite a modelagem de materiais piezolétricos. O *PLANE 2* é um elemento triangular com seis nós e foi empregado na modelagem da região próxima a trinca ou entalhe. Nas demais regiões da viga utilizou-se o elemento *PLANE 42*, que é um elemento quadrilátero de quatro nós.

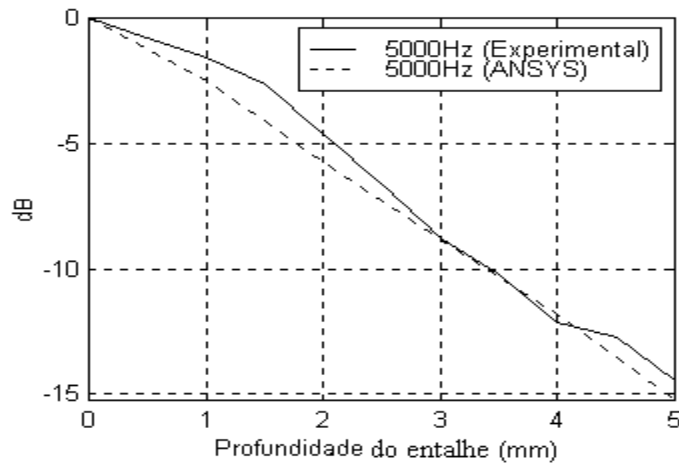


**Figura 5.** Malha de elementos finitos utilizada na modelagem de uma viga de alumínio com um entalhe e cerâmicas piezolétricas.

De maneira semelhante aos experimentos, na simulação por elementos finitos a viga foi excitada pelo atuador piezolétrico e obteve-se a resposta em frequência do sinal do sensor para cada comprimento da trinca. Os resultados são apresentados na Figura 6, onde constata-se um comportamento análogo ao que foi observado experimentalmente. Na Figura 7, pode-se observar a concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a viga de alumínio.



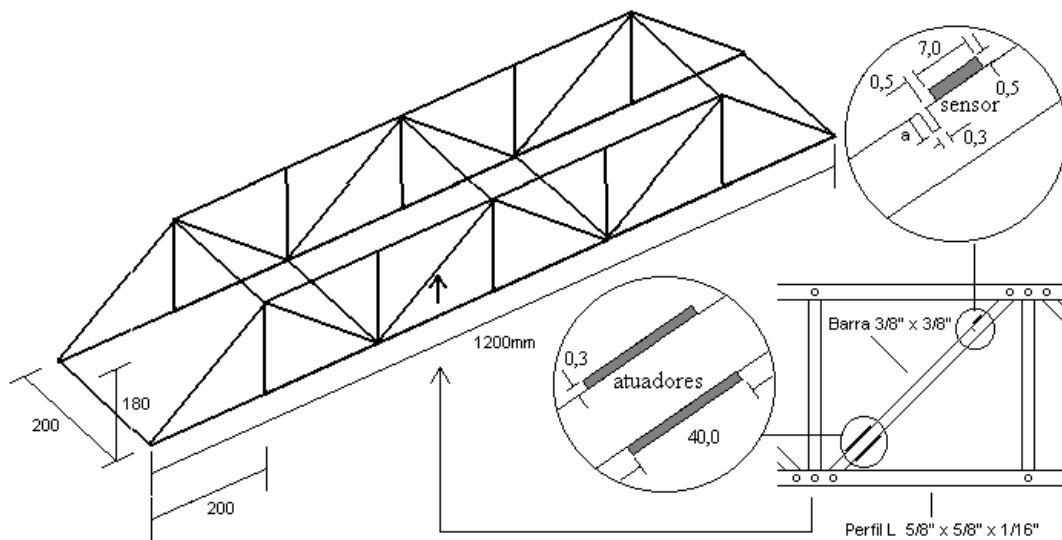
**Figura 6.** FRF para diferentes tamanhos do entalhe (a). Redução em dB na amplitude da FRF em algumas frequências selecionadas (b).



**Figura 7.** Comparação entre os resultados experimentais e o método de elementos finitos.

#### 4. MONITORAÇÃO DE DEFEITOS EM ESTRUTURAS

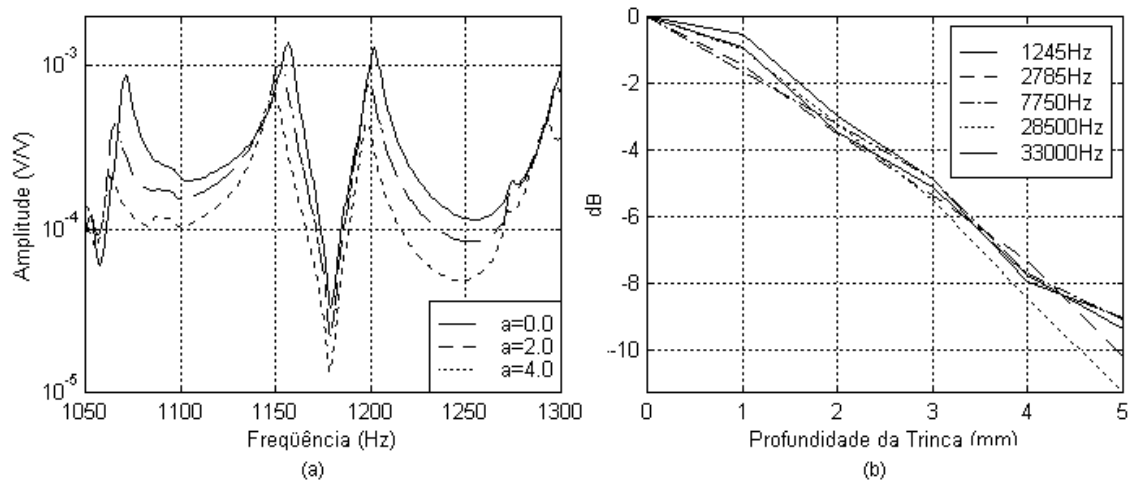
Nesta seção, o método para monitoração de defeitos descrito nas seções anteriores, é avaliado para aplicações em estruturas de maior complexidade. A estrutura apresentada na Figura 8, foi construída com 29 barras aparafusadas em quatro cantoneiras de alumínio. Em uma das barras de alumínio, indicada na Figura 8, foi colocado um atuador e um sensor piezelétrico. Nos experimentos realizados com esta estrutura, repetiu-se o mesmo procedimento para acompanhamento de defeitos superficiais apresentado anteriormente. Primeiramente, as FRFs entre 0 e 12 KHz foram obtidas excitando a estrutura com um atuador piezelétrico e medindo sua resposta com o sensor piezelétrico.



**Figura 8.** Monitoração do crescimento de um entalhe em uma estrutura.

As FRFs, servirão como referência para o estado inicial da estrutura, em que esta não apresenta nenhum defeito próximo ao sensor. Em seguida, usinou-se um entalhe com 0,3 mm de largura e com profundidade inicial de 0,5 mm, distante cerca de 0,5 mm do sensor. Este entalhe foi aprofundado gradualmente e para cada incremento em sua profundidade, obteve-se uma nova curva de resposta em frequência. A Figura 9(a), mostra as FRFs entre 1025 e 1400 Hz, para as várias profundidades do entalhe. A redução no sinal do sensor piezelétrico a

medida em que o entalhe se torna mais profundo, pode também ser observada na Figura 9(b) para algumas frequências escolhidas num espectro mais amplo.



**Figura 9.** FRF para diferentes tamanhos do entalhe (a). Redução na amplitude da FRF(b).

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, um método para monitoração da propagação de defeitos superficiais em estruturas através da análise do sinal de sensores piezelétricos instalados próximo de falhas ou defeitos, foi descrito e avaliado por simulações e experimentos. Distintamente de outros procedimentos com objetivos semelhantes, neste método atuadores e sensores podem ser incorporados a estrutura, possibilitando o desenvolvimento de sistemas autônomos para monitoração de defeitos ou falhas.

A exploração prática deste método requer entretanto estudos adicionais para correlacionar a variação no sinal de sensores piezelétricos com a propagação de defeitos, levando-se em consideração a geometria, localização da falha, e as dimensões dos sensores. Outro ponto importante, é a possível influência de fatores ambientais sobre a resposta elétrica de sensores piezelétricos. Estas questões ainda estão abertas para investigações e são no momento objeto de estudo dos autores do presente trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Badcock, R. A. and Birt, E. A., 1998, "The use of 0-3 piezocomposite embedded Lamb wave sensors for damage detection in advanced fibre composites", Proc. of the 4th European Conference on Smart Structures and Materials, Harrogate, UK, July, pp. 373-388 .
- Braga, A.M.B., Gama, A.L. and de Barros, L.P.F., 1998, "Models for the high frequency response of active piezoelectric composite beams", Proc. of the 4th European Conference on Smart Structures and Materials, Harrogate, UK, July 6-8, pp115-122.
- Gama, A. L., 1998, "Modelagem de Elementos Piezoelétricos para Excitação e Sensoriamento de Sinais Acústicos de Alta Frequência em Vigas Compósitas", Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lin, M. and Chang, F. K., 1999, "Built-in diagnostics for composite structures, Proc. of PACAM IV, Vol. 7, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 613-614.
- Monkhouse, R.S.C., Wilcox, P.W., Lowe, M.J.S., Dalton, R.P. and Cawley, P., 1998, "The rapid monitoring of structures using interdigital Lamb wave transducers", Proc. of the 4th European Conference on Smart Struc. and Mat., Harrogate, UK, July, pp. 397-404.