

## CALIBRAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO EQUIVALENTE COM DANO A PARTIR DE TÉCNICA DE SHM E OTIMIZAÇÃO NÃO LINEAR

Paulo Roberto Chiquito<sup>a</sup>, Carlos Alberto Bavastri<sup>a</sup>, Juan E. Perez Ipiña<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Pesquisa em Vibrações e Som em Sistemas Mecânicos, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, Curitiba - PR, Brasil, [p.r.chiquito@gmail.com](mailto:p.r.chiquito@gmail.com) - [bavastri@ufpr.br](mailto:bavastri@ufpr.br). CNPQ

<sup>b</sup>Grupo de Mecánica de Fractura, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [juan.perezipina@fain.uncoma.edu.ar](mailto:juan.perezipina@fain.uncoma.edu.ar). PVE CAPES, UNComa-CONICET

**Palavras Chave:** Função Resposta em Frequência, SHM, Identificação de trinca.

**Resumo.** O crescente interesse no monitoramento de vida em estruturas, mais conhecido como SHM - *Structural Health Monitoring*, está associado com o potencial dessa linha de pesquisa em prognóstico de danos. Essa metodologia baseia-se em identificar danos ou defeitos em uma estrutura, ou parte dela, e determinar a sua vida útil remanescente, trazendo assim, benefícios econômicos e confiabilidade. A existência de trincas em uma estrutura sujeita a cargas cíclicas caracteriza um alerta à integridade estrutural da mesma. Nestas últimas décadas, a preocupação com metodologias que possam ser aplicáveis ao prognóstico de dano tem aumentado consideravelmente, juntamente com o número de estudos sobre o assunto. Isso decorre da existência de muitas estruturas que já ultrapassaram a estimativa de vida de projeto, mas são viáveis economicamente se ainda mantidas em operação. Nesse trabalho foi proposta uma metodologia interdisciplinar, com o objetivo de obter um modelo numérico equivalente de uma viga livre, com fissura, através de um modelo de elementos finitos. Para tal fim, foram implementadas técnicas de monitoramento de análises de vibração e Emissão Acústica - EA em conjunto com um algoritmo de otimização não linear. A identificação da trinca ou fissura é obtida por um ajuste de mínimos quadrados entre funções resposta em frequência - FRF's medidas e suas equivalentes obtidas por elementos finitos. Esse ajuste foi realizado minimizando o erro entre as FRFs mencionadas em um ambiente de otimização utilizando algoritmos genéticos. Informações de formas de onda dos sinais de EA, provenientes do crescimento da trinca na estrutura, foram utilizadas para definir a região de busca da localização da trinca. Após a identificação do dano acumulado na estrutura, é possível realizar o prognóstico de vida através de cálculos de Mecânica da Fratura. A aplicação dessa metodologia é promissora, pois a Emissão Acústica auxilia em um primeiro momento na localização de trincas, reduzindo o intervalo de busca em um ambiente de otimização. O modelo de elementos finitos permite modelar a estrutura com trinca e a dinâmica de estruturas fornece um modelo preciso para a identificação que será realizada em um ambiente de otimização. Um exemplo numérico-experimental está descrito nesse trabalho visando validar a metodologia proposta. São também apresentados os modelos de dano em elementos finitos equivalentes à estrutura real, assim como os resultados da metodologia proposta e as simulações realizadas.

## 1 INTRODUÇÃO

A grande maioria das indústrias deseja detectar danos em sua infraestrutura o mais cedo possível, antes que uma falha catastrófica possa ocorrer. Isso é um exemplo dos atuais investimentos tecnológicos em SHM - *Structural Health Monitoring* (Farrar & Worden, 2006). Com o diagnóstico da estrutura, aliado a uma base de dados, um modelo numérico e um modelo de falha, é presumível realizar o prognóstico da evolução do dano, ou seja, uma antecipação do evento de falha. Dessa forma, conhecer as características espaciais e/ou modais de uma estrutura é fundamental para o processo prognóstico de dano a partir dos estudos de vibrações. Com estas informações, somadas aos carregamentos e condições de contorno monitoradas constantemente, é possível apresentar o estado atual da estrutura e realizar uma previsão do crescimento de dano até que a mesma esteja comprometida (Chondros, *et al.*, 1998, Farrar & Lieven, 2007).

A detecção de trincas usando técnicas de mudanças nas frequências naturais e nas amplitudes das FRF's - Funções Resposta em Frequência, tem sido utilizada por autores na bibliografia. Entre muitos, destaca-se o trabalho de Owolabi *et al.* (2003). Nandwana e Maiti (1997), que, ao usarem as técnicas mencionadas acima, puderam identificar as trincas, ou seja, obtiveram o tamanho e a localização das mesmas.

A maioria dos modelos encontrados na literatura utiliza uma mola rotacional para representar uma trinca e a sua conseqüente perda de rigidez em uma estrutura. Para obter a resposta em frequência de uma viga trincada, usou-se um modelo de elementos finitos unidimensional, sendo que, nesse modelo, a mola é localizada no lugar onde supostamente a trinca estava (Nandwana & Maiti, 1997, Chinchalkar, 2001, Presezniak *et al.*, 2007).

Vários são os autores que mostraram que os modos de vibrar são mais sensíveis do que as frequências naturais para caracterizar danos. Dentre as técnicas que fazem uso dos modos de vibrar destacam-se: *Damage Index Method*, *Mode Shape Curvature Method*, *Strain Energy Method* e *Change in Flexibility Method*. Outra forma de localizar danos através de parâmetros estatísticos consiste em usar o critério de confiança modal, ou MAC - *Modal Assurance Criterion*- e sua correlação COMAC - *CO-ordinate Modal Assurance Criterion* - (Engelbrecht, 2000 e Parloo *et al.*, 2003).

Presezniak *et al.*, (2007) propuseram uma metodologia para identificar trincas em uma viga livre através de técnicas de otimização não linear. Essa identificação foi realizada no domínio wavelet ajustando curvas correspondentes aos modos de vibrar obtidos por um modelo de elementos finitos, onde a trinca foi modelada através de uma mola torcional, e sua equivalente obtida via análise modal numérico experimental. Com os resultados desse ajuste, a trinca foi identificada (tamanho e a localização).

Existem vários métodos capazes de identificar trincas, como por exemplo, a utilização de líquidos penetrantes, medições por ultra-som, etc. A necessidade de acesso aos componentes e monitoramento contínuo para este tipo de análise dificulta muito este trabalho quando se trata de estruturas complexas. Devido à variação das características dinâmicas da estrutura, como mudança das frequências naturais, ou mudanças de forma modos de vibração, os métodos baseados em medições de respostas vibratórias têm recebido especial atenção (Li *et al.*, 2005).

Esse trabalho teve por objetivo implementar, de forma numérica-experimental, a identificação de trinca em vigas de laboratório, visando sua aplicação futura no processo prognóstico de danos de estruturas reais em campo. Assim, foram mensuradas FRF's das vigas em determinados momentos após ensaio de fadiga e buscou-se a comparação com FRF's obtidas numericamente através da formulação de elementos finitos. O algoritmo de otimização busca uma solução de mínimo erro entre a FRF mensurada e a FRF simulada. Para reduzir o tempo computacional, a técnica de Emissão Acústica – EA é usada para localizar

trincas crescentes e limitar uma faixa de busca.

## 2 MODELO NUMÉRICO

A modelagem de uma viga com trinca foi realizada em um software comercial de elementos finitos.

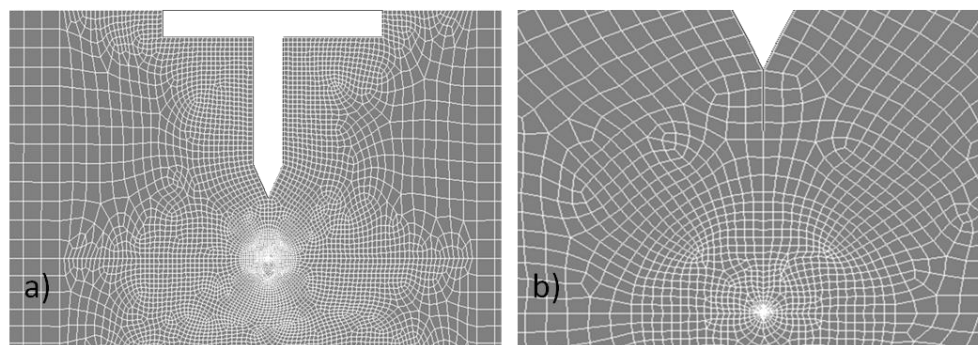


Figura 1: a) Malha em elementos finitos do entalhe e trinca. b) Detalhe da malha na ponta da trinca.

O elemento usado para a malha é bidimensional e de ordem elevada, com oito nós. Possui um comportamento quadrático de deslocamento e dois graus de liberdade, sendo translações nas direções  $x$  e  $y$ . Os elementos em torno da extremidade da trinca são degenerados no ponto de singularidade, chamados *quarter-point*, vide Figura 1.

O material considerado para a simulação é do tipo estrutural linear e isotrópico. Para a análise modal não foi alocada qualquer restrição de deslocamento uma vez que a condição simulada é de viga livre, a mesma condição imposta no experimento.

O cálculo dos modos de vibrar leva em consideração o problema de autovalores e autovetores não-amortecido, dado por:

$$[s^2M + K]\phi = 0. \quad (1)$$

Os autovalores dessa equação ocorrem aos pares e são imaginários puros e conjugados da forma:

$$\begin{aligned} s_j &= i\Omega_j \\ s_j^* &= -i\Omega_j \end{aligned} \quad (2)$$

A Eq. (2) permite que a Eq. (1) possa ser escrita da forma clássica:

$$K\phi = \Omega^2 M\phi. \quad (3)$$

A solução deste problema, Eq. (3), conduz diretamente a  $\Omega^2$  e  $\Phi_j$ .

## 3 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Foi empregada uma técnica de otimização evolutiva multi-variável e multi-objetivo, utilizando o solver de um software comercial de otimização. Os algoritmos genéticos foram utilizados a fim de encontrar uma FRF do modelo numérico equivalente a uma FRF de um sistema real.

### 3.1 O Problema de Otimização

O vetor projeto e a função objetivo, utilizados para calibração do modelo de elementos finitos, com respostas equivalentes ao corpo de prova testado, são definidos pelas Eq. (4) e

Eq. (5):

$$X = [E D \nu L B H x_t t_t (\xi_i, i = 1:6) pl_e pa_e e_e x_{rc} h_c c_c] \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} f_1(x) = |f_{n_{1real}} - f_{n_{1modelo}}| \\ f_2(x) = |f_{n_{2real}} - f_{n_{2modelo}}| \\ f_3(x) = |A_1(\Omega)_{n_{real}} - A_1(\Omega)_{n_{modelo}}| \\ f_4(x) = |A_2(\Omega)_{n_{real}} - A_2(\Omega)_{n_{modelo}}| \end{cases} \quad (5)$$

Sendo:

$E$ , o módulo de elasticidade;

$D$ , a densidade do material;

$\nu$ , o coeficiente de Poisson do material;

$L$ , o comprimento da viga;

$B$ , a espessura da viga;

$H$ , a altura da viga;

$x_t$ , a localização da trinca;

$t_t$ , o tamanho da trinca sem contabilizar o entalhe;

$[\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \xi_6]$ , o vetor de amortecimento modal;

$pl_e$ , a profundidade da porção linear do entalhe;

$pa_e$ , a profundidade da porção angular do entalhe;

$e_e$ , a espessura do entalhe;

$x_{rc}$ , a posição do rebaixo para instalação do *clip gage*;

$h_c$ , a profundidade do rebaixo;

$c_c$ , o comprimento do rebaixo;

$f_{n_{i_{real}}}$ , a  $i$ -ésima frequência natural do sistema real;

$f_{n_{i_{modelo}}}$ , a  $i$ -ésima frequência natural do modelo;

$f_1(x), \dots, f_4(x)$ , as funções objetivo;

$A_i(\Omega)_{n_{real}}$ , a inércia mensurada no ponto  $i$ ;

$A_i(\Omega)_{n_{modelo}}$ , a inércia calculada para o ponto  $i$ .

Para cada variável  $x_i$  dentro de  $X$  foi determinada uma condição de limite,  $x_{min} \leq x_i \leq x_{max}$ , definida pela faixa de medição dos parâmetros de geometria, pela distribuição estatística da localização de trinca, dada pela técnica de EA, e por uma banda de 2% de distribuição em torno dos valores de referência, encontrados na literatura, para vetores de amortecimento e parâmetros materiais. As funções que compõem  $Z$  nada mais são do que funções que calculam o erro linear, ou quadrático, das frequências naturais  $f_n$ , ou inércias  $A_i(\Omega)_n$ .

Uma vez definidos o vetor projeto e a função objetivo, o problema de otimização é dado pela Eq. (6).

$$\min(Z) \Rightarrow \min[f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)] \quad (6)$$

Onde  $x \in S \subseteq R^n$ .

### 3.2 Algoritmo Genético

A população inicial foi definida de forma randômica dentro dos limites das variáveis. O método de busca por soluções foi o MOGAI (*Multi Objective Genetic Algorithm*), diferenciado de outros algoritmos genéticos pela forma na qual é calculado o *ranking* das

soluções. Alguns parâmetros do método de busca são apresentados na [Tabela 1](#).

Número de Gerações	Probabilidade de Crossover	Probabilidade de Seleção	Probabilidade de Mutação
100	50%	5%	10%

Tabela 1: Parâmetros do MOGAI.

#### 4 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento desse trabalho foram estudadas duas vigas, *A* e *B*, em aço com baixo teor de carbono, pré-fissuradas em seus entalhes por fadiga. As duas vigas são apenas semelhantes a corpos de prova SE(B) definidos na norma ASTM E 399, e possuem diferenças geométricas e de origem de fabricação se comparadas entre si.

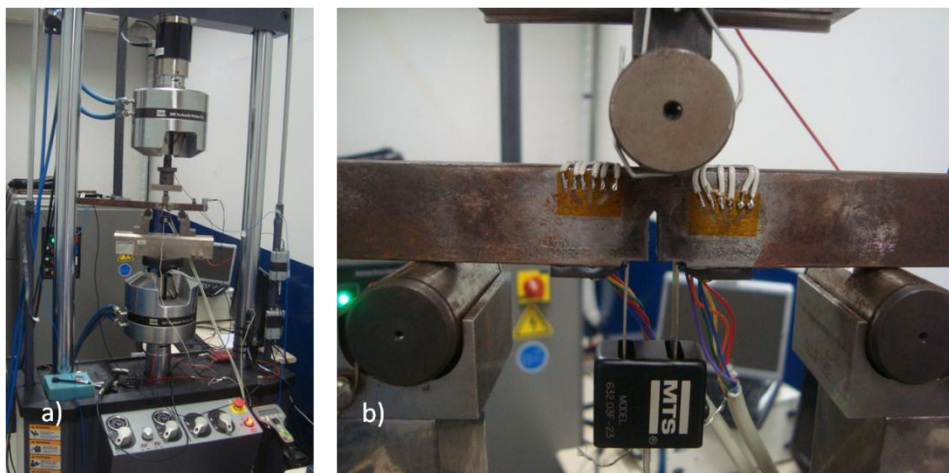


Figura 2: a) Máquina de fadiga servo-hidráulica. b) Detalhe da montagem do sistema de aplicação de carga em três pontos e *clip gage*.

A máquina universal de ensaio, utilizada para carregamentos cíclicos nas vigas *A* e *B*, é uma *MTS™ 370-50*. Essa máquina possui um controlador ativo, atuadores de deslocamento axial hidráulicos e uma célula de carga com capacidade de  $250\text{ kN}$ . Os dispositivos instalados na máquina permitem uma montagem para ensaios de fadiga em três pontos para crescimento de trincas conforme mostra a [Figura 2-a](#). A partir do *clip gage* instalado na face externa perpendicular à trinca, [Figura 2-b](#), é possível extrair o valor do CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) e estimar um tamanho de trinca em função da relação linear entre a variação da abertura da trinca e a variação da carga (*compliance*) conforme demonstram as Eq. (7) e (8).

$$a = W(c_0 + c_1 u_x + c_2 u_x^2 + c_3 u_x^3 + c_4 u_x^4 + c_5 u_x^5) \quad (7)$$

Os coeficientes  $c_i$  na Eq. (7) são constantes e são estimados dependendo da montagem do *clip gage* na viga.  $H$  é a altura da viga e  $u_x$  dado na Eq. (8).

$$u_x = \frac{1}{1 + \sqrt{(EBC)\left(\frac{4H}{S}\right)}} \quad (8)$$

Na Eq.(8),  $E$  é o módulo de elasticidade do material da viga,  $B$  a sua espessura,  $C$  o *compliance* e  $S$  a distância entre os roletes de apoio na máquina de teste (vide [Figura 2](#)).

Os acelerômetros usados possuem uma faixa linear de resposta entre 0,5 e 10 *kHz*. Tanto o martelo de impacto quanto os acelerômetros são da marca *PCB™ Piezotronics*. Dois

acelerômetros foram instalados posicionados aleatoriamente na superfície discretizada da viga como mostra a [Figura 3](#).

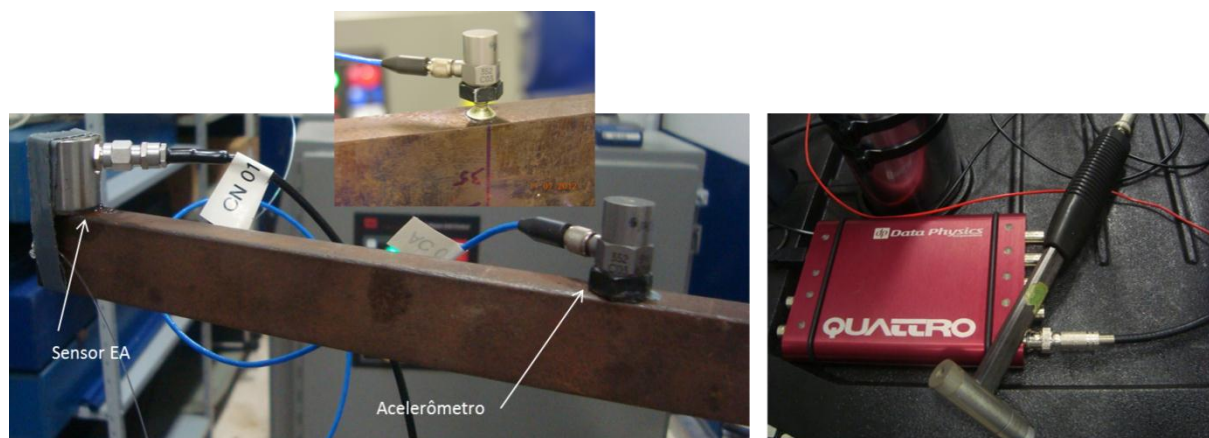


Figura 3: a) Instalação de sensores de EA e acelerômetros. b) Analisador de vibrações e martelo de impacto.

Para mensurar as FRF's (Inertância), o analisador de vibrações utilizado foi o *QUATTRO* da *Data Physics*<sup>TM</sup>. As vigas foram instaladas em uma condição livre de apoios ou restrições no espaço durante as medições. As excitações foram provocadas pelos impactos do martelo em um determinado ponto da viga e as respostas de aceleração obtidas nos pontos de instalação dos acelerômetros.

Foram também utilizados dois sensores de EA, instalados nas extremidades de cada viga ensaiada, para uma estimativa da localização linear de trincas crescentes durante o carregamento cíclico. São sensores comerciais, da *PASA*<sup>TM</sup>, modelo *Wsa*, sensores de banda larga, com pico de ressonância em  $520\text{ kHz}$  e faixa operacional de  $20\text{ kHz}$  a  $1\text{ MHz}$ . Os amplificadores foram ajustados para um ganho de  $40\text{ dB}$ . O equipamento que realizou a aquisição de sinais para dois canais, um para cada sensor, foi o *SAMUS*, também da *PASA*<sup>TM</sup>. A velocidade da onda elástica no meio material foi calculada através de testes de quebra de grafite no próprio corpo de prova, ([Custódio et al., 2009](#)), e obteve-se uma média de  $5,4 \cdot 10^6\text{ mm/s}$ . A velocidade  $v$  é um dos parâmetros necessários para localização linear de eventos acústicos em uma viga conforme evidencia a Eq. (9).

$$x = (L - v\Delta t)/2 \quad (9)$$

A localização linear, a partir da referência de instalação do sensor, é dada por  $x$  na Eq. (9).  $L$  é a distância entre os sensores e  $\Delta t$  a diferença de tempo de chegada da frente de onda elástica nos dois sensores de EA.

#### 4.1 Identificação da Trinca

O processo de identificação das características da trinca iniciou-se no diagnóstico do SHM, através de eventos de EA gerados durante o carregamento cíclico na máquina universal de ensaios e crescimento das trincas nas vigas.

A viga para ensaio foi escolhida e mensurada, instrumentada conforme descrito acima e submetida a esforços cíclicos, sob condição de fadiga em três pontos. A máquina universal de ensaios solicita mecanicamente a viga até que seja possível a detecção de trincas crescentes na estrutura através da propagação de ondas elásticas no meio material.

O crescimento de trinca é observado pela técnica da EA com um curto intervalo de tempo de monitoramento. As ondas elásticas de superfície detectadas pelos sensores de EA apontam para uma provável localização de uma trinca crescente no corpo de prova. Isso ocorre porque,

no crescimento de trinca, há uma liberação de energia potencial para formação de novas superfícies e deformação plástica. Uma parte desta energia gera ondas elásticas de deformação que se propagam a uma velocidade constante no meio e vão ao encontro dos sensores. A localização dos eventos de EA para um corpo de prova de teste é visualizado na Figura 4. Nota-se que a localização não é precisa, mas possui uma curva normal de distribuição em torno de um valor médio que se encontra em 248 mm para a viga B, e uma diferença de 2 mm da posição do entalhe. Na viga A foi obtido um valor médio de 151 mm, com uma diferença de 1 mm da posição do entalhe. Esta etapa serve para reduzir o intervalo de busca na localização da trinca que foi realizada utilizando a TONL – Técnica de Otimização Não Linear.

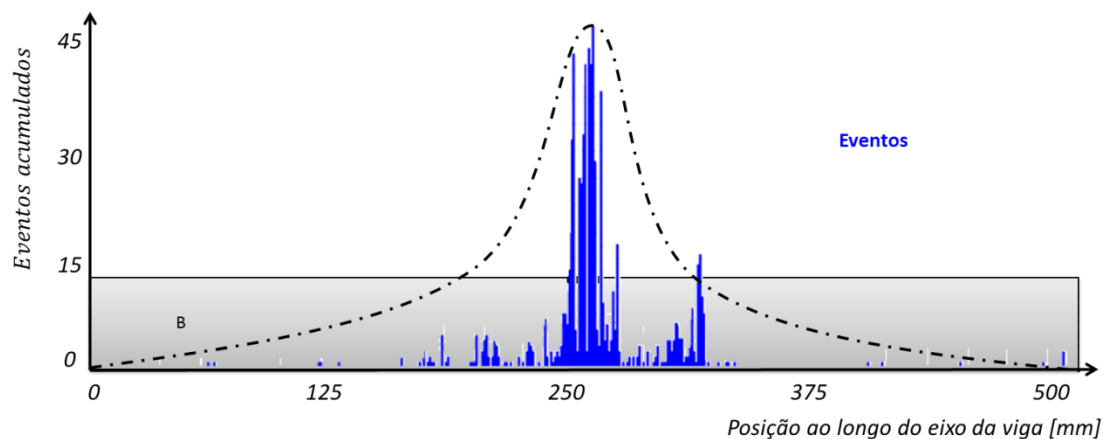


Figura 4: a) Malha em elementos finitos do entalhe e trinca. b) Detalhe da malha na ponta da trinca.

O ensaio é, então, interrompido momentaneamente para que possa ser realizada a parametrização de todo o sistema através da TONL. Até esse momento, não se conhece nenhuma variável ótima de geometria e de material que possa representar um modelo equivalente, nem a localização e o tamanho da trinca do sistema.

Sob condição de viga livre, o sistema é excitado através do martelo de impacto em um ponto escolhido aleatoriamente. As FRF's são mensuradas a partir dos pontos de instalação dos acelerômetros. Os resultados são armazenados e enviados para uma base de dados.

O algoritmo de otimização é executado para calibração do sistema, onde se busca minimizar os erros entre os valores das medições e aqueles obtidos numericamente, como as frequências naturais e as FRF's. A partir disso, um modelo equivalente é selecionado. Nessa ocasião, os parâmetros modais são extraídos através de uma análise modal por elementos finitos, onde os seis primeiros modos são utilizados. A partir do modelo modal (modos de vibrar, frequências naturais e fatores de perda) é possível construir a FRF (receptância), Eq. (10).

$$\alpha_{ks}(\Omega) = \sum_{j=1}^n \frac{j A_{ks}}{\Omega_j^2 - \Omega^2 + i \Omega_j^2 \eta_j} \quad (10)$$

Derivando a Eq. (10) duas vezes, encontra-se a inertância,  $A(\Omega)$ , Eq. (11)

$$A(\Omega) = -\Omega^2 \alpha_{ks}(\Omega) \quad (11)$$

O algoritmo de otimização utilizado não fornece apenas uma resposta, mas sim, vários resultados ótimos que pertencem à fronteira de Pareto. Aplica-se, então, um filtro de dados, onde se busca reduzir a quantidade de indivíduos apontados no conjunto solução e seleciona-se apenas um resultado, considerado ótimo.

Ao final da calibração obtêm-se todos os parâmetros de geometria e material da viga em estudo. A hipótese adotada na identificação da trinca estabeleceu que não existem alterações de geometria nem das variáveis materiais e, ainda, se uma trinca foi localizada ela não mudará de direção durante seu crescimento. Dessa forma, todas as variáveis de projeto apresentadas anteriormente são fixadas, com exceção do tamanho da trinca e do vetor de amortecimento.

## 5 RESULTADOS

Os resultados da calibração inicial do sistema permitiram converter grande parte das variáveis como constantes para as próximas análises. Esses resultados são apresentados na [Tabela 2](#).

Variável	A	B	Unidade
$E$	201,4	207,1	$GPa$
$D$	7934,0	7712,0	$kg/m^3$
$\nu$	0,29	0,29	-
$L$	499,76	499,49	$mm$
$B$	13,03	18,58	$mm$
$H$	24,63	37,35	$mm$
$x_t$	149,96	250,60	$mm$
$t_t$	3,59	2,09	$mm$
$pl_e$	10,40	4,64	$mm$
$pa_e$	2,39	2,31	$mm$
$e_e$	2,21	2,25	$mm$
$x_{rc}$	142,45	242,51	$mm$
$h_c$	1,92	1,904	$mm$
$c_c$	15,72	15,73	$mm$

Tabela 2: Resultados de calibração das vigas A e B.

Para se obter o tamanho de trinca do modelo numérico, comparável com o tamanho de trinca definido pela teoria de Mecânica da Fratura, a seguinte transformação foi realizada:

$$a = pl_e + pa_e + t_t \quad (12)$$

No decorrer do teste de fadiga, o tamanho de trinca foi monitorado por duas técnicas diferentes: *compliance* e outra manualmente por uma escala com  $0,02mm$  de resolução. Esses valores serviram como referências de comparação dos valores dados pelo método de medição das FRF's e TONL com o modelo numérico. Na [Tabela 3](#) são apresentados os valores obtidos por essas três técnicas para a viga A e B.

Método		Compliance	TONL / Erro		Escala / Erro	
Viga A	$a(0)$	16,37mm	16,37mm	0,0%	15,62mm	4,6%
	$a(1)$	17,14mm	17,26mm	0,7%	16,78mm	2,1%
Viga B	$a(0)$	9,56mm	9,04mm	5,4%	8,82mm	7,7%
	$a(1)$	12,93mm	12,69mm	1,9%	12,64mm	2,2%
	$a(2)$	17,86mm	17,75mm	0,6%	17,20mm	3,7%

Tabela 3: Resultados de tamanho de trincas obtidos por *compliance*, TONL e escala para as vigas A e B.

Durante o crescimento de trinca em uma estrutura ocorre a perda de rigidez. Notou-se que as frequências naturais são decrescentes em função do aumento no crescimento da trinca. Esses resultados foram extraídos do modelo numérico e apresentados na [Tabela 4](#).

É válido lembrar que uma estrutura pode variar sua frequência natural devido a fatores externos e ambientais, como exemplo, as variações de temperatura. Mas nesse trabalho esse



fator é desconsiderado, pois a temperatura ambiente de laboratório é constante e em torno de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Frequências	Viga A		Viga B		
	$a(0)$	$a(1)$	$a(0)$	$a(1)$	$a(2)$
1ª $f_n$	392,8Hz	369,9Hz	743,3Hz	703,2Hz	625,4Hz
2ª $f_n$	1064,9Hz	1034,0Hz	2083,9Hz	2083,2Hz	2081,1Hz
3ª $f_n$	2470,6Hz	2454,6Hz	3779,7Hz	3647,1Hz	3403,8Hz
4ª $f_n$	4031,4Hz	3964,0Hz	5097,2Hz	4993,9Hz	4815,7Hz

Tabela 4: Resultados das frequências naturais para cada tamanho de trinca para as vigas A e B.

A Figura 5 ilustra uma parte dos resultados da Tabela 4, em uma faixa de 0 – 1500 Hz, para a viga B. São medições realizadas nos dois pontos da viga e resultados obtidos por simulação.

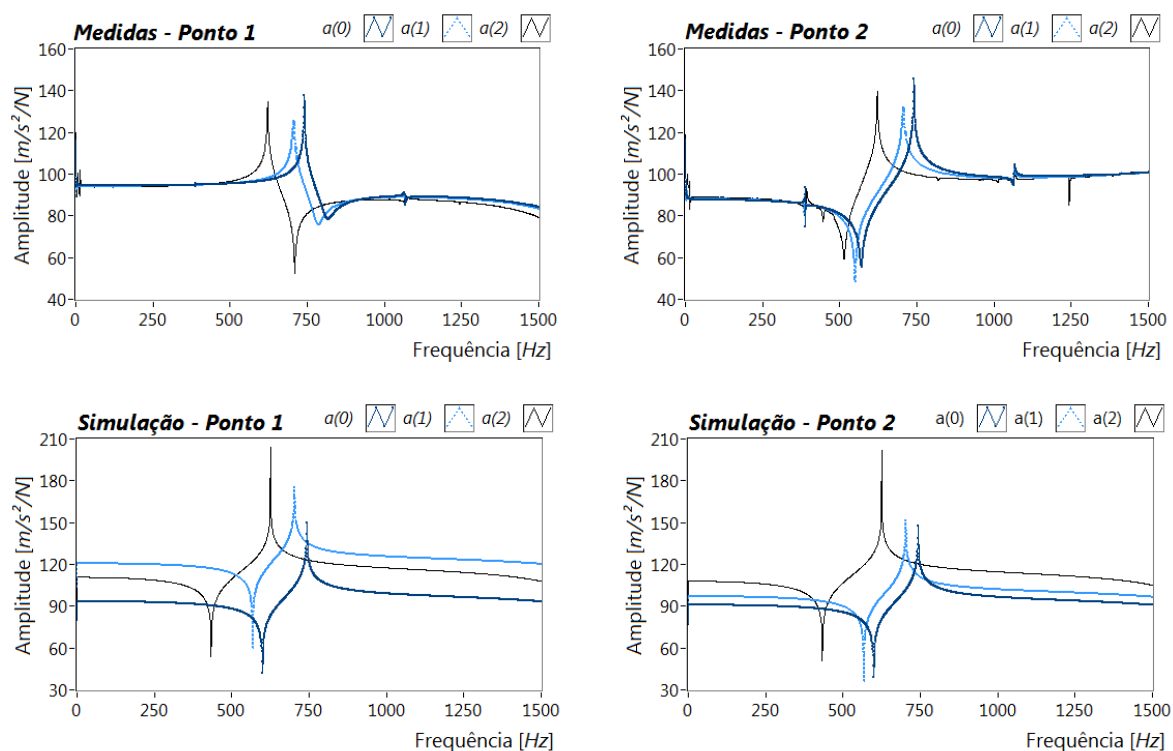


Figura 5: Comparação das FRF's salientando as alterações nas frequências naturais com o crescimento da trinca.

Da Figura 6 à Figura 10 estão apresentados os gráficos das FRF mensuradas, dos pontos onde os acelerômetros foram instalados, contrapostas com as FRF obtidas via cálculo e modelo numérico.

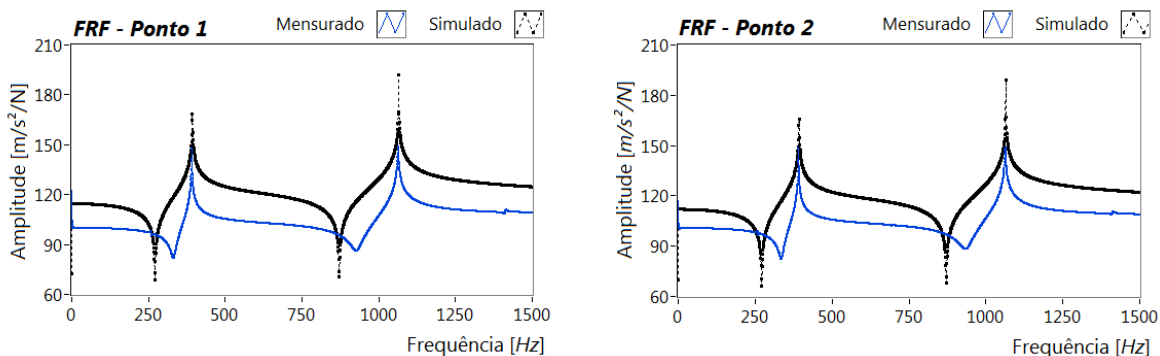


Figura 6: Viga A – FRF para tamanho de trinca  $a(0)$ .

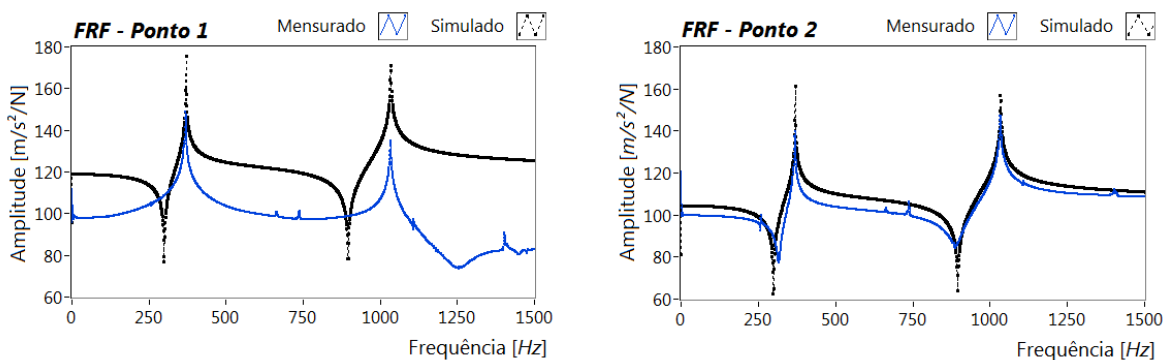


Figura 7: Viga A – FRF para tamanho de trinca  $a(1)$ .

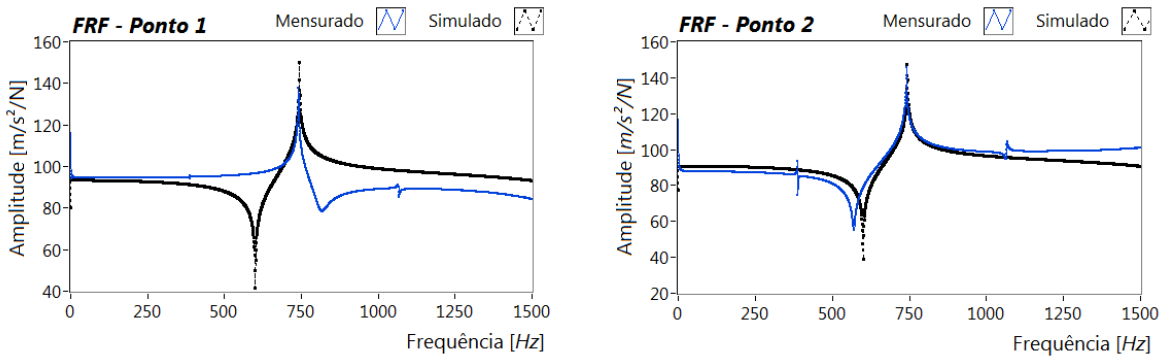


Figura 8: Viga B – FRF para tamanho de trinca  $a(0)$ .

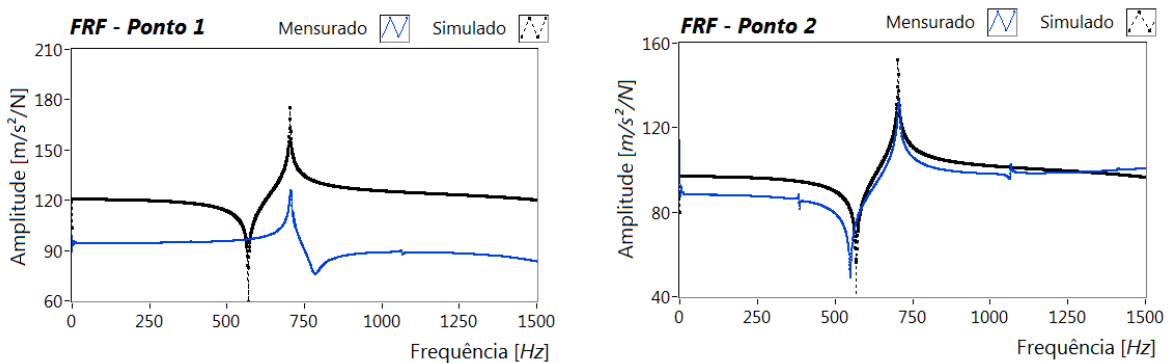


Figura 9: Viga B – FRF para tamanho de trinca  $a(1)$ .

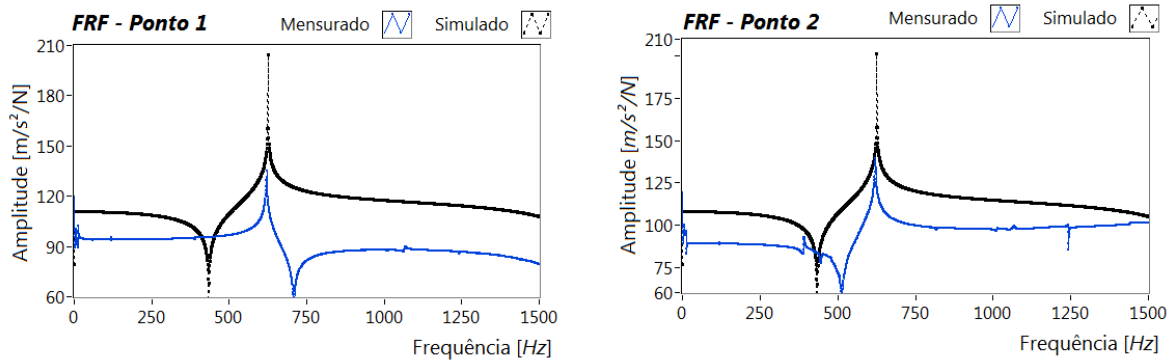


Figura 10: Viga B – FRF para tamanho de trinca  $a(2)$ .

## 6 CONCLUSÕES

A identificação da trinca nas estruturas de estudo foi possível graças à instrumentação usada no sistema SHM. Dentre as técnicas utilizadas no SHM, a principal foi a TONL usada para minimizar o erro entre repostas das FRF's da estrutura real e as obtidas do modelo numérico em elementos finitos.

Ao contrário dos métodos que utilizam apenas variações nas frequências naturais, onde somente grandes tamanhos de trinca podem ser identificados, este método foi capaz de identificar, numericamente, as pequenas variações causadas pela presença de uma trinca nas FRF's. Mais estudos são requeridos para identificar trincas de pequeno comprimento e assim identificar a sensibilidade do método.

Gadéa (2002), já afirmava que as FRF's forneciam informações suficientes para identificar um dano estrutural. Essa foi uma das constatações desse trabalho, pois os erros apresentados na identificação das trincas foram inferiores a 5,5% para o comprimento de trinca comparado através do *compliance* e 0,2% para a localização. Desse modo entende-se que os resultados são satisfatórios.

A técnica de Emissão Acústica, uma das utilizadas pelo SHM, pôde auxiliar na localização do dano, reduzindo o intervalo de busca no algoritmo de otimização e, conseqüentemente, no tempo de processamento.

## REFERÊNCIAS

- Farrar, C. R. & Worden, K., An Introduction to Structural Health Monitoring, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, Vol. 365, pp. 303-315, 2006.
- Chondros, T. G., Dimarogonas, A. D. & Yao, J., Longitudinal Vibration of a Bar With a Breathing Crack, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 503-518, 1998.
- Farrar, C. R. & Lieven, N. A. J., Damage Prognosis: The Future of Structural Health Monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 365, pp. 623-632, 2007.
- Owolabi, G. M., Swamidas, A. S. J. & Seshadri, R., Crack Detection in Beams Using Changes in Frequencies and Amplitudes of Frequency Response Functions, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 265, pp. 1-22, 2003.
- Nandwana, B. P. & Maiti, S. K., Detection of the Location and Size of a Crack in Stepped Cantilever Beams Based on Measurements of Natural Frequencies, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 203, pp. 435-446, 1997.
- Chinchalkar, S., Determination of Crack Location in Beams Using Natural Frequencies, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 247, pp. 417-429, 2001.

- Presezniak, F. A., Ipiña, J. E. P. & Bavastri, C. A., *Prognóstico de Danos: Técnicas Numéricas para Detecção de Falhas e Predição de Vida Útil em Estruturas Simples*, CMNE/CILAMCE, Issue © APMTAC, 2007.
- Li B., Chen X. F., Ma J. X., He Z. J., Detection of crack localization and size in structures using wavelet finite element methods, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 285, pp. 767-782, 2005.
- Engelbrecht, A., *A Structural Integrity Monitoring Using Vibration Measurements - Master of Engineering*, Pretoria, University of Pretoria - Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, 2000.
- Parloo, E., Verboven, P., Guillaume, P. & Van Overmeire, M., Force Identification by Means of in-Operation Modal Models, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 262, pp. 161-173, 2003.
- Custódio, J., Tiboni, G., Filippin, C. G., Mello, G., Moura, N. C., *Alternativa à Sapata de Nielsen para Obtenção de Fonte de Sinal na Determinação da Reprodutibilidade da Resposta de Transdutor de Emissão Acústica*, Santos, CONAENDE&IEV, 2010.
- Gadéa, A. *Identificação de danos estruturais a partir das funções de resposta em frequência*, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2002.