



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102020024888-0 A2



(22) Data do Depósito: 04/12/2020

(43) Data da Publicação Nacional: 21/06/2022

(54) **Título:** TÉCNICA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA E O CONCEITO DE ENERGIA

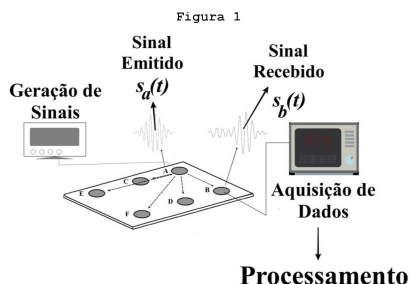
(51) **Int. Cl.:** G01N 29/14.

(52) **CPC:** G01N 29/14.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO; UNIVERSITY OF SURREY.

(72) **Inventor(es):** BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO; FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA; FRANCESCO CIAMPA.

(57) **Resumo:** TÉCNICA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA E O CONCEITO DE ENERGIA. A presente invenção se refere a uma nova técnica de monitoramento, diagnóstico e localização de danos em materiais utilizando o algoritmo proposto e transdutores piezelétricos. A técnica apresentada é capaz de detectar e localizar um dano por meio da construção de uma imagem em que cada pixel é o valor da probabilidade da ocorrência de um dano.



**TÉCNICA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS
UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA E O CONCEITO DE ENERGIA**

Campo da invenção:

[001] A detecção e o diagnóstico de falhas em estruturas aeroespaciais, navais, civis, mecânicas tem ganhado atenção global nas últimas décadas. O objetivo é se promover um elevado grau de segurança humana e redução de custos por meio de manutenções preditivas mais eficientes. A presente invenção refere-se a uma nova técnica para localização de danos em estruturas podendo envolver os mais diversos tipos de materiais. Essa identificação e localização foi realizada por meio de transdutores piezelétricos e processamento de sinais baseados no conceito de energia. Falhas como furos, trincas, corrosões, etc podem ser localizadas por meio do invento proposto.

Estado da técnica:

[002] O desenvolvimento de técnicas cujo objetivo é se garantir a segurança e integridade infraestruturas civis, mecânicas, navais e aeroespaciais continuam a ser uma ciência em desenvolvimento. Tais aparatos são comumente conhecidos como sistemas de SHM do termo em inglês *Structural Health Monitoring* e têm como objetivo detectar danos estruturais em estágio inicial, proporcionando um elevado nível de segurança e a redução de custos através de manutenções preditivas mais rápidas e eficientes. A detecção de dano deve ser realizada através de técnicas não destrutivas, minimamente invasivas à estrutura monitorada. Essas técnicas são conhecidas como NDT (*Non-Destructive Techniques* - técnicas não destrutivas) e podem ser utilizadas em uma grande variedade de estruturas (FOTI, D. **Non-destructive**

techniques and monitoring for the evolutive damage detection of an ancient masonry structure. Key Engineering Materials, v. 628, p. 168-177, 2015.).

[003] Uma das técnicas NDT que vem ganhando destaque é a técnica baseada nas ondas de Lamb, também conhecida como ondas acústicas guiadas (BRPI0710986B1, concedida em 26/06/2018, **Aparelho para a inspeção de um tubo, e, método para inspecionar um tubo usando o mencionado aparelho de inspeção**), (KIM, T. et al. **Flexible 1-3 Composite Ultrasound Transducers With Silver-Nanowire-Based Stretchable Electrodes.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 67, p. 6955 - 6962, 2020), (QING, X.; LI, W.; WANG, Y.; SUN, H. **Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications.** Sensors, v. 19, p. 545, 2019.).

[004] A detecção de falhas é obtida pela propagação de ondas de ultrassom entre uma matriz de transdutores piezelétricos que são configurados como emissores e receptores. No entanto, devido à complexidade das características de propagação das ondas, como a conversão de modos, dispersões, reflexões, a maioria desses sistemas utiliza um sinal de referência para realizar a detecção e localização de danos (COMBANIÈRE, P. C., et al. **Interaction Between SH0 Guided Waves and Tilted Surface-Breaking Cracks in Plates.** IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 66, p. 119-128, 2019), (BRATH, A; et al. **Guided Wave Tomography of Pipe Bends,** IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 64, p. 847-858, 2017).

[005] Basicamente, ondas são emitidas e recebidas pelos transdutores piezelétricos quando a estrutura é considerada como íntegra. Esse comportamento é tomado como a referência do sistema e um dano pode ser diagnosticado quando existe alterações nesse padrão dos sinais.

[006] Todavia, conforme descreve o documento de patente US 8, 176, 786 B2, publicado em 15/05/2012, "Methods, Apparatuses, and Systems for Damage Detection", as mudanças ambientais, como variações de temperatura, carga ou ruído, podem influenciar no padrão de referência criando uma conclusão errônea sobre a condição da estrutura. Além disso tem-se o risco de o próprio padrão de referência ter sido extraído quando a estrutura já possui falhas (KALIBATAS, M, et al. **Flow Field Imaging With Ultrasonic Guided Waves for Exploring Metallic Melts**, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 64, p. 112-119, 2018), (DOUGLASS, A.; HARLEY, J. **Dynamic Time Warping Temperature Compensation for Guided Wave Structural Health Monitoring**. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 65, p. 851-861, 2018).

[007] O documento de patente US 8, 176, 786 B2, publicado em 15/05/2012, "Methods, Apparatuses, and Systems for Damage Detection", descreve que, devido aos problemas encontrados nos sistemas que utilizam referência para se diagnosticar danos estruturais, metodologias independentes, ou seja, livres de referência, foram desenvolvidas.

[008] Neste contexto, Qiu et al. (2018) e Sun et al. (2019), propuseram métodos independentes com base na

similaridade entre ondas propagadas por caminhos com e sem danos (SUN, A. et al. **Baseline-free damage imaging for metal and composite plate-type structures based on similar paths.** *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 15, p. 1-14, 2019), (QIU, J., et al. **A baseline-free damage detection approach based on distance compensation of guided waves** *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, v. 24, p. 1-17, 2018.).

[009] Uma outra abordagem foi proposta por Lim et al. (2014) que utilizou a espectroscopia não linear de ondas elásticas e análise de wavelets para a correta localização de falhas (LIM, H., et al. **Reference-free fatigue crack detection using nonlinear ultrasonic modulation under various temperature and loading conditions.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 45, p. 468-78, 2014).

[010] Phalavan e Blacquièrre (2016) desenvolveram uma técnica de dimensionamento de trincas por fadiga em aço através do padrão de reflexões dos modos de onda (PAHLAVAN, L; BLACQUIÈRE, G. **Fatigue crack sizing in steel bridge decks using ultrasonic guided waves.** *NDT&E International*, v. 77, p. 49-62, 2016).

[011] Uma das técnicas independentes mais utilizadas é o método virtual de reversão de tempo. O documento de patente US 7, 937, 248 B2, publicado em 03/05/2011, "Virtual Time Reversal Acoustics for Structural Health Monitoring", descreve que esse método é normalmente dividido em duas etapas. Na primeira, um sinal estreito de frequência conhecido é emitido por um transdutor piezoeletrico emissor e recebido por uma matriz de transdutores receptores. As

ondas são recebidas, gravadas e revertidas no domínio do tempo. Na segunda etapa, esses sinais invertidos no tempo são reemitidos na estrutura. Se a estrutura estiver em seu estado íntegro, os sinais recebidos na segunda etapa deverão ter semelhanças com o sinal emitido na primeira etapa (HUANG, L., et al. **"An Efficient Time Reversal Method for Lamb Wave-Based Baseline-Free Damage Detection in Composite Laminates,** Applied Sciences, v. 9, p. 11, 2019), (WANG, Q; YUAN, S. **Baseline-free imaging method based on new PZT sensor arrangements.** *Journal of Intelligent Material Systems and Structures,* v. 20, p. 1663-1673, 2009.), (PODDAR, B, et al. **Time reversibility of a Lamb wave for damage detection in a metallic plate.** *Smart Materials and Structures,* v. 20, p. 025001, 2011).

[012] Liu et al. (2015) propôs uma abordagem derivada do método de reversão virtual do tempo. Na primeira etapa, um sinal estreito de frequência conhecido é emitido por um transdutor piezelétrico emissor e recebido por uma matriz de transdutores receptores. As ondas são recebidas e gravadas. Na segunda etapa, por meio dos sinais gravados e de operações matemáticas, tenta-se reconstruir o sinal emitido no domínio do tempo. Caso o sinal reconstruído divirja do emitido, o caminho contém danos. Caso contrário, isto é, se o sinal reconstruído for igual ao sinal emitido, o caminho de propagação da onda não possui falhas (LIU, Z. et al. **Baseline-free delamination inspection in composite plates by synthesizing noncontact air-coupled Lamb wave scan method and virtual time reversal algorithm.** *Smart Materials and*

Structure, v. 24, p. 045014, 2015). Todavia, de acordo com Wang, Cai e Zhou (2019) e Du et al. (2018) a complexidade da propagação das ondas de Lamb interfere diretamente e torna crítico o processo de reconstrução do sinal no domínio do tempo (DU, F., et al. **Preload Monitoring of Bolted L-Shaped Lap Joints Using Virtual Time Reversal Method**, Sensors, v.18, p. 1928, 2018), (WANG, X.; CAI, J.; ZHOU, Z. **A Lamb wave signal reconstruction method for high-resolution damage imaging**, Chinese Journal of Aeronautics, v. 32, 2019).

[013] Todos esses esforços culminaram com técnicas que não necessitam de um armazenamento ou conhecimento prévio da condição estrutural. Essas metodologias apresentadas foram aplicadas para a identificação e localização de danos nos mais diversos tipos de estruturas. Dessa forma, é notória a importância do desenvolvimento de sistemas que possibilitem o diagnóstico de uma falha estrutural. O objetivo é se promover um elevado grau de segurança humana e redução de custos por meio de manutenções preditivas mais eficientes. E, como visto, há uma grande parcela de contribuição da comunidade científica e da indústria no que tange a esse assunto. Porém, não há nenhum registro de uma técnica independente de localização de falhas que utilize somente a energia dos sinais emitidos e recebidos e que também não necessite de reconstrução de sinais no domínio do tempo.

[014] Neste contexto, a presente invenção propõe um sistema para a localização de danos, sem a necessidade de extração de um referencial da estrutura. A técnica se baseia em apenas uma etapa de emissão e recepção de sinais

acústicos, sem a necessidade de inversão, reemissão ou mesmo da reconstrução de sinais no domínio do tempo. Apresenta-se, o invento, com uma solução simples para se diagnosticar trincas, furos, oxidações ou qualquer outro tipo de dano que venha acarretar materiais compósitos, metálicos, plásticos, etc. O método do invento tem simples implementação e é aplicável em sistemas que demandam baixo custo computacional. A técnica apresentada é capaz de detectar e localizar um dano por meio da construção de uma imagem em que cada pixel é o valor da probabilidade da ocorrência de um dano. Essa característica permite que operadores sem conhecimento técnico tenha conclusões sobre a condição estrutural pela simples visualização de uma imagem intuitiva.

Breve descrição da invenção:

[015] Refere-se o presente pedido de patente a uma técnica de localização de danos em materiais por meio do uso dos transdutores piezelétricos e da energia de sinais. O sistema é constituído de:

[016] Transdutores piezelétricos e suas variações, por exemplo diafragmas PZT ou qualquer outro transdutor de emissão acústica.

[017] Um hardware de aquisição de dados para capturar os sinais dos transdutores durante a aplicação da técnica.

[018] Qualquer tipo de gerador que possa excitar os transdutores piezelétricos configurados como emissores de ondas.

[019] Um computador/interface com o usuário que será responsável pelo processamento dos sinais e cálculo das energias para a localização de falhas em materiais.

[020] Em relação aos procedimentos: a descrição da invenção será feita com base em um modelo matemático e um estudo de caso, especificando as posições dos transdutores, o tipo de material estudado etc. Porém, a invenção estende-se as mais diversas opções e tipos transdutores e de materiais (sólidos, líquidos e gases), além de se estender às técnicas aplicadas ao diagnóstico e monitoramento de processos, máquinas e peças industriais.

[021] Dessa forma, no estudo de caso, utilizou-se um uma rede de 8 transdutores piezelétricos fixados em estrutura de alumínio e de fibra de carbono. Cada transdutor foi configurado, separadamente, como emissor e, os demais, como receptores, configurando um modelo com 1 emissor e 7 receptores, que se alternaram entre si. Um sinal de estreito de 5 ciclos, de 50 V de amplitude e frequência 200 kHz excitou o emissor. Os sinais provenientes dos transdutores configurados como receptores foram coletados a uma taxa de amostragem de 2 MHz por meio de um osciloscópio. De posse dos dados, os sinais foram processados digitalmente com a implementação do algoritmo de diagnóstico de danos, que será mostrado a seguir. Cabe destacar que o invento se estende também a qualquer outro tipo de configuração de sinal emitido (amplitude, fase, ciclos, frequência (as) e forma) ou de qualquer outra quantidade, tipo e configuração dos transdutores acoplados nos mais diversos tipos de materiais e estruturas.

Breve descrição das figuras:

[022] Para melhor compreender o invento, seguem as descrições das figuras apresentadas:

[023] **Figura 1:** Representação esquemática do processo para compreensão da modelagem matemática e do invento proposto.

[024] **Figura 2:** ilustração do material utilizado para o estudo de caso.

[025] **Figura 3:** tabela com as coordenadas dos transdutores fixados na estrutura considerada.

[026] **Figura 4:** gráfico dos índices quando o transdutor 1 é configurado como emissor.

[027] **Figura 5:** gráfico dos índices quando o transdutor 2 é configurado como emissor.

[028] **Figura 6:** gráfico dos índices quando o transdutor 3 é configurado como emissor.

[029] **Figura 7:** gráfico dos índices quando o transdutor 4 é configurado como emissor.

[030] **Figura 8:** gráfico dos índices quando o transdutor 5 é configurado como emissor.

[031] **Figura 9:** gráfico dos índices quando o transdutor 6 é configurado como emissor.

[032] **Figura 10:** gráfico dos índices quando o transdutor 7 é configurado como emissor.

[033] **Figura 11:** gráfico dos índices quando o transdutor 8 é configurado como emissor.

[034] **Figura 12:** Imagem dos danos formada pelo invento, considerando o coeficiente de energia.

[035] **Figura 13:** Imagem dos danos formada pelo invento, considerando a energia relativa.

Descrição detalhada da invenção:

[036] Tomando como base a Figura 1, onde um conjunto de transdutores piezelétricos é anexado a uma estrutura, tem-se um sinal emitido pelo transdutor A ($s_a(t)$) e o sinal recebido ($s_b(t)$) pelo transdutor B. A relação matemática estabelece que o sinal $s_b(t)$ é formado pela convolução do sinal $s_a(t)$ com a função de transferência $h(t)$ do caminho entre o transdutor A e B, sendo que:

$$[037] \quad s_b(t) = s_a(t) \otimes h(t - \tau) = \int_0^t s_a(\tau) h(t - \tau) d\tau.$$

(1)

[038] Uma vez que o material não tenha danos e a reciprocidade linear não tenha sido quebrada, pode-se afirmar que (DU, F., et al. **Preload Monitoring of Bolted L-Shaped Lap Joints Using Virtual Time Reversal Method**, Sensors, v.18, p. 1928, 2018):

$$[039] \quad s_a(t) = s_b^*(t) \otimes h(t - \tau) = \int_0^t s_b^*(\tau) h(t - \tau) d\tau,$$

(2) em que $s_b^*(t)$ é o complexo conjugado de $s_b(t)$.

[040] O equacionamento matemático do invento se inicia com a aplicação da desigualdade de Cauchy-Schwarz, que prova que (ALDAZ, J. M., et. al. **Advances in operator Cauchy-**

Schwarz inequalities and their reverses. *Annals of Functional Analysis*, v. 6, p. 275-95, 2015):

$$[041] \quad |s_a(t)|^2 = \left| \int_0^t s_b^*(t)h(t-\tau)d\tau \right|^2 \leq \int_0^t |s_b^*(t)|^2 d\tau \int_0^t |h(t-\tau)|^2 d\tau.$$

(3)

[042] A equação (3), trabalhada algebricamente é equivalente a:

$$[043] \quad |s_a(t)| \leq \sqrt{\int_0^t |s_b^*(t)|^2 d\tau} \sqrt{\int_0^t |h(t-\tau)|^2 d\tau}.$$

(4)

[044] A energia E de um sinal qualquer $s(t)$ é expressa, por definição, como:

$$[045] \quad E[s(t)] = \int_0^t |s(t)|^2 dt.$$

(5)

[046] Utilizando o conceito de energia da equação (5) e trabalhando algebricamente a equação (4), tem-se que:

$$[047] \quad \sqrt{E[s_a(t)]} \leq \sqrt{E[s_b^*(t)]E[h(t-\tau)]}.$$

(5)

[048] Por essa desigualdade, tem-se:

$$[049] \quad 0 \leq \frac{\sqrt{E[s_a(t)]}}{\sqrt{E[s_b(t)]E[h(t-\tau)]}} \leq 1.$$

(6)

[050] A energia de um sinal qualquer $s(t)$ no domínio do tempo se relaciona com o domínio da frequência, pela relação:

$$[051] \quad E[s(t)] = \int_0^t |s(t)|^2 dt = \int_0^\omega |S(\omega)|^2 d\omega = E[S(\omega)].$$

(7)

[052] No domínio da frequência a equação (2) se torna:

$$[053] S_a(\omega) = S_b^*(\omega)H(\omega).$$

(8)

[054] A função de transferência, ou função resposta em frequência $H(\omega)$ é definida como:

$$[055] H(\omega) = \frac{S_b(\omega)}{S_a(\omega)}.$$

(9)

[056] Aplicando-se as equações (8) e (9) na equação (6) n, tem-se, por definição desse invento, o coeficiente de energia (C_E) que é um inédito índice apresentado por esta invenção que auxiliará na localização de danos em estruturas:

$$[057] C_E = \frac{\sqrt{E\left[\frac{S_b^*(\omega)S_b(\omega)}{S_a(\omega)}\right]}}{\sqrt{E[S_b^*(\omega)]E\left[\frac{S_b(\omega)}{S_a(\omega)}\right]}}.$$

(10)

[058] A presente invenção também define um outro índice para o diagnóstico de danos, a energia relativa (E_R), dada por:

$$[059] E_R = \frac{E\left[\frac{S_b^*(\omega)S_b(\omega)}{S_a(\omega)}\right]}{E[S_a(\omega)]}.$$

(11)

[060] Os índices podem ser aplicados em qualquer combinação entre os pares de emissores e receptores para o diagnóstico de danos. Os índices devem exibir os menores

valores para os caminhos próximos às falhas e, próximos de 1, indicam a ausência de danos.

[061] Para a construção de uma imagem que exiba a probabilidade de ocorrência do dano ($PD(x,y)$) em cada ponto (x,y) de uma estrutura, considerando cada par de transmissores i e receptores k , para um total de N transdutores instalados na estrutura, esses índices podem ser empregados de acordo com as seguintes equações (sendo $k \neq i$):

$$[062] \quad PD(x,y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{1}{C_{Eik}} \left(\frac{1,05 - R_{ik}(x,y)}{0,05} \right) & \text{caso } 1,05 > R_{ik}(x,y) \\ 0 & \text{caso } 1,05 < R_{ik}(x,y) \end{cases},$$

(12)

$$[063] \quad PD(x,y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{1}{E_{Rik}} \left(\frac{1,05 - R_{ik}(x,y)}{0,05} \right) & \text{caso } 1,05 > R_{ik}(x,y) \\ 0 & \text{caso } 1,05 < R_{ik}(x,y) \end{cases}.$$

(13)

[064] Em que (x_k, y_k) e (x_i, y_i) são, respectivamente, as coordenadas dos transdutores receptores e emissores. $R_{ik}(x,y)$ é definido como:

$$[065] \quad R_{ik}(x,y) = \frac{\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_i - y)^2} + \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2}}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}}.$$

(14)

[066] As equações (12), (13) e (14) são baseadas em um algoritmo de imagem conhecido como RAPID ("*Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage*", o que quer dizer, em português, "algoritmo de reconstrução para inspeção probabilística de danos"). No entanto, esse método de construção de imagem é utilizado para sistemas que utilizam um sinal de referência para realizar a detecção e

localização de danos (CIAMPA, F. **Nonlinear elastic wave tomography for the imaging of corrosion damage**, *Ultrasonics*, v. 62, p. 147-155, 2015).

[067] Após a modelagem matemática acima, faz-se um estudo de caso desse novo invento que realiza a identificação e localização de danos de uma forma independente, ou seja, sem a utilização de sinais de referência extraídos quando a estrutura se encontra em condição íntegra.

[068] A presente proposta para a localização de danos em estruturas foi aplicada em um material compósito do tipo fibra de carbono com dimensões (285 mm x 285 mm x 2 mm), conforme se ilustra na Figura 2. Um conjunto de 8 transdutores piezelétricos foram anexados ao material por meio de uma cola a base de cianoacrilato, conforme Figura 2. As coordenadas dos transdutores estão apresentados na Figura 3. O transdutor utilizado foi o PIC255-000041371, com 5 mm de diâmetro e 0,25 mm de espessura. Cada transdutor foi configurado como emissor e, os demais, como receptores. Qualquer outro tipo de emissor ou sensor de ondas pode ser utilizado. Desse modo, possibilitou-se a formação de 7 "caminhos" para cada transdutor. Os transdutores se alternaram entre si como emissores e receptores de modo a cobrir todas as combinações possíveis de emissão e recepção.

[069] Para cada combinação, um sinal senoidal de 5 ciclos, com amplitude de 50 V alimentou os transdutores emissores. Para a recepção dos sinais um sistema de aquisição (PicoScope 4424) com 12 bits de resolução foi configurado com uma taxa de aquisição de 4 MHz. Um dano (furo de 10 mm) foi inserido no material compósito na posição (170, 65) mm.

[070] Após adquiridos pelo transdutor, os sinais foram processados digitalmente por meio do software MATLAB.

[071] Para todas as combinações de emissão e recepção, aplicou-se as equações (10) e (11) para o cálculo dos dois índices propostos por essa invenção. De posse desses dados, aplicou-se as equações (12) e (13) para a construção da imagem.

[072] Na Figura 4 é ilustrado os valores dos índices C_E e E_R quando o transdutor 1 é configurado como emissor e, os demais, como receptores. Observa-se que ambos os índices possuíram menor valor quando o transdutor 6 foi escolhido como receptor. O resultado é totalmente coerente uma vez que este caminho é o que possui menor distância ao ponto do dano. Deste modo, pode-se concluir que a reta formada entre os transdutores 1 e 6 é mais próxima à falha do que as outras combinações. Quando os tradutores 2, 3, 4 e 5, são configurados como emissor, conforme é mostrado, respectivamente, nas Figuras 5, 6, 7 e 8, os menores valores de ambos os índices se deram para os caminhos formados pelos pares de combinações 2 - 7, 3 - 7, 4 - 7 e 5 - 7. Pela observação da Figura 2 fica nítido que as retas formadas por esses caminhos são mais próximas ao dano. Mediante a análise das Figuras 9, 10 e 11, quando os transdutores 6, 7 e 8 são configurados como emissores, os menores valores dos índices permaneceram nos caminhos 6 - 1, 7 - 4 e 8 - 6, respectivamente.

[073] A aplicação das Equações 12 e 13 constroem, nitidamente, o formato da estrutura bem como o dano inserido. Cada valor de pixel ($PD(x,y)$) corresponde à probabilidade de

ocorrência do dano. Os valores foram traduzidos em escala de cinza no software Matlab, mas pode ser realizado por qualquer outro. Desta forma a invenção também se trata de um sistema interativo e de fácil compreensão da localização de danos em estruturas.

[074] Considerando a posição real do dano (170, 65) mm, o valor encontrado da sua localização, para o algoritmo apresentado na equação 12 foi de (164, 63) mm, o que equivale a um erro de 6,32 mm. Já para a equação 13, o valor de localização do dano foi de (168, 64) mm, o que equivale a um erro de localização de apenas 2,23 mm

[075] Dessa forma, o invento apresentado é uma técnica de detecção de falhas em estruturas, baseado na energia dos sinais emitidos e recebidos por um conjunto de transdutores. Essa característica torna-a como alternativa eficaz para ensaios não destrutivos os quais demandam baixo custo computacional e interatividade com o usuário.

REIVINDICAÇÕES

1. **TÉCNICA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA E O CONCEITO DE ENERGIA, caracterizado pelo** fato de utilizar o diagnóstico de danos em materiais com a aplicação dos índices denominados "coeficiente de energia" e "energia relativa", baseado nas equações (10), (11), (12) e (13) transdutores piezelétricos.

2. **TÉCNICA,** de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pela** aplicação nos mais diversos tipos de materiais sólidos, como qualquer tipo de metal, cerâmica, composto, sendo eles isolantes, semicondutores, dielétricos, ou mesmo em qualquer material líquido ou em estado gasoso, podendo variar o tipo e a quantidade de transdutores empregados.

3. **TÉCNICA,** de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado pelo** fato de que se pode variar a posição e o tipo dos transdutores, podendo ser escolhida conforme a sensibilidade ou por qualquer outro fator, inclusive serem colocados embutidos dentro do próprio material, aplicados em transmissão com ou sem fio, sendo utilizado qualquer tipo de material, sensor ou transdutor que emita ou receba ondas mecânicas acústicas em qualquer faixa (as) de frequência.

4. **TÉCNICA,** de acordo com as reivindicações 1 a 3, **caracterizado pelo** fato de que os transdutores podem ser fixados de diversas formas, podem ser colados, embutidos, fixados por parafusos ou por imãs em diversos materiais e estruturas, sendo até mesmos conectados por cabos ou transmissão sem fio.

5. TÉCNICA, de acordo com as reivindicações 1 a 4, **caracterizado pelo** fato de poder ser utilizado em sinais originais ou mesmo mediante a aplicação de filtros analógicos e digitais a partir da seleção de bandas de frequência que melhor descrevem as condições do teste.

6. TÉCNICA, de acordo com as reivindicações 1 a 5, **caracterizado pelo** fato de ser utilizado em diversos sistemas como na avaliação de máquinas elétricas, aparelhos industriais, peças industrializadas, ou qualquer aparato que englobe a indústria petrolífera, naval, de conformação, metalúrgica, aeroespacial, automobilística, aeronáutica, civil e mecânica. Também considera-se qualquer tipo de dano, falha ou não conformidade produzida por qualquer fator físico, químico, ambiental, por maquinário ou biológico.

7. TÉCNICA, de acordo com as reivindicações 1 a 6, **caracterizado pelo** fato de o método criado pode ser executado em outros ou quaisquer algoritmos de construção de imagem.

FIGURAS

Figura 1

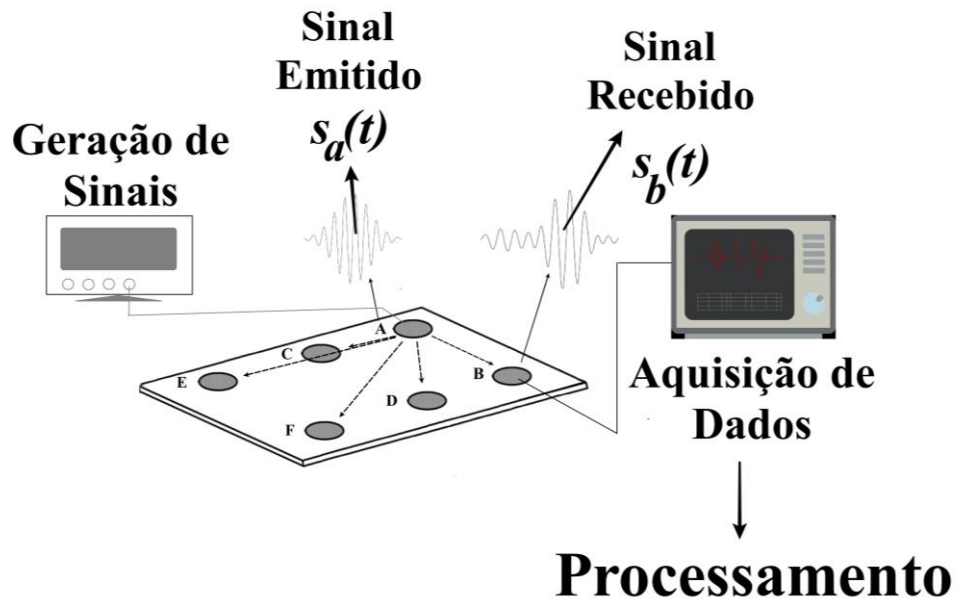


Figura 2

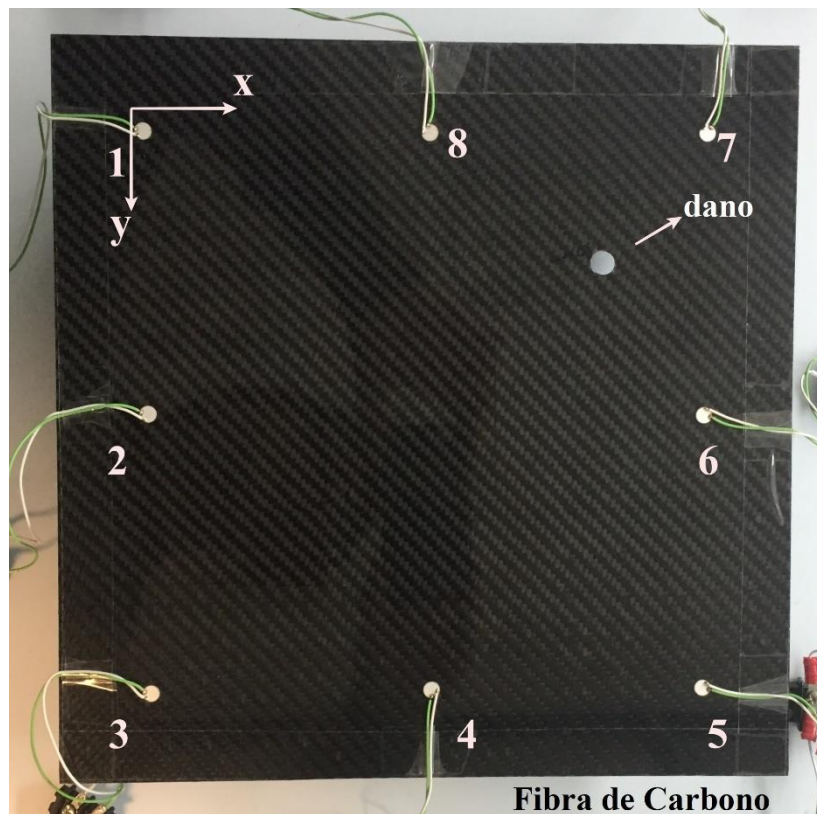


Figura 3

Transdutor	Posição (x,y) [mm]
1	(0, 0)
2	(107.5, 0)
3	(215, 0)
4	(215, 107.5)
5	(215, 215)
6	(107.5, 215)
7	(0, 215)
8	(0, 107.5)

Figura 4

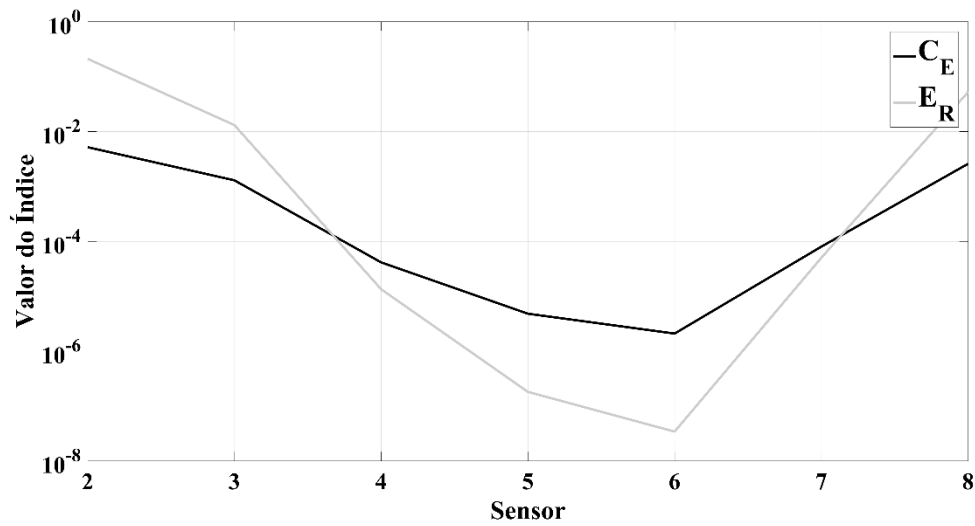


Figura 5

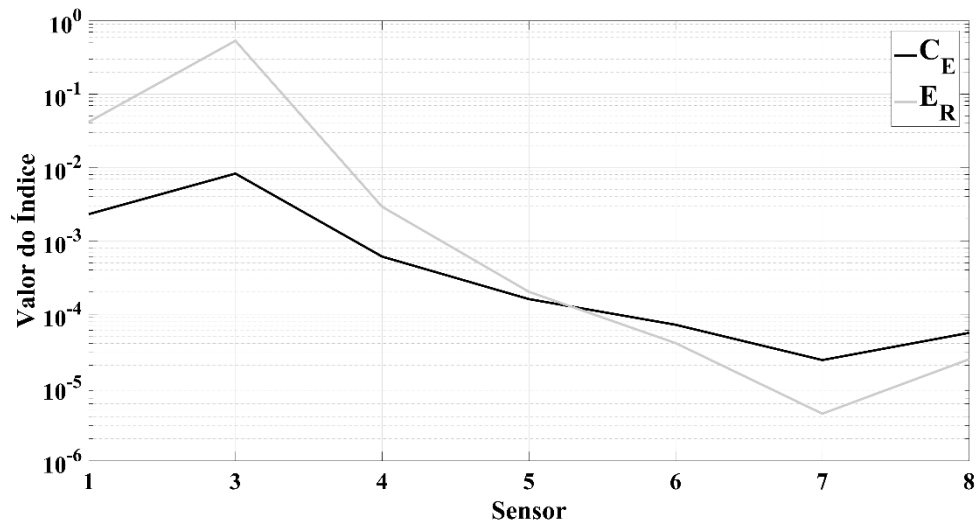


Figura 6

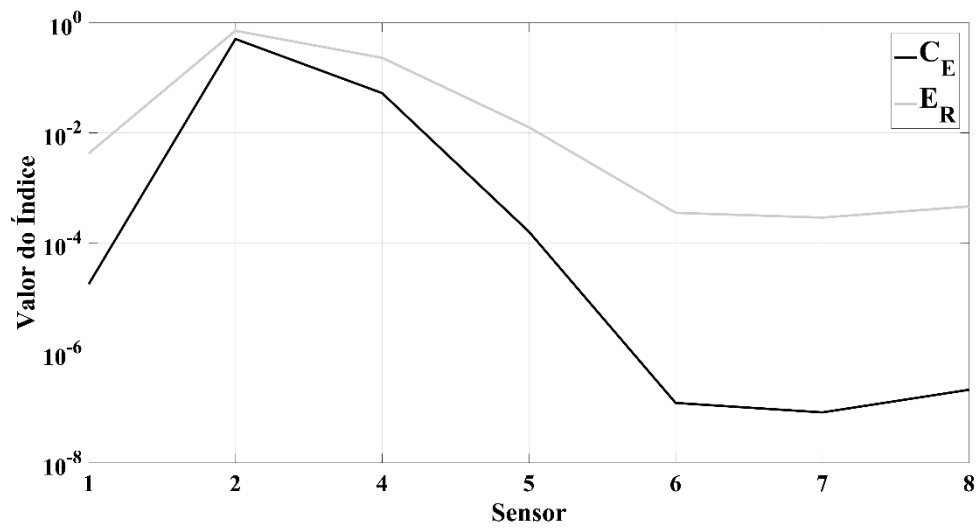


Figura 7

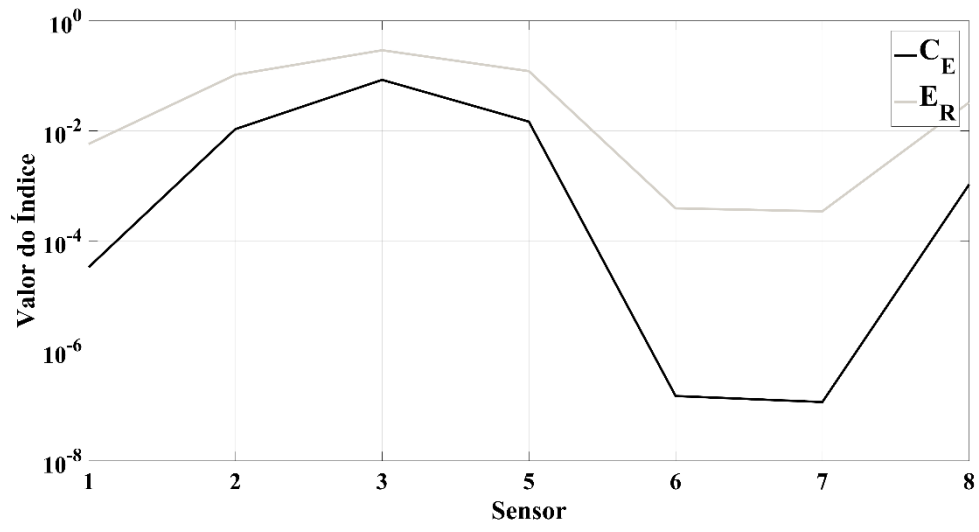


Figura 8

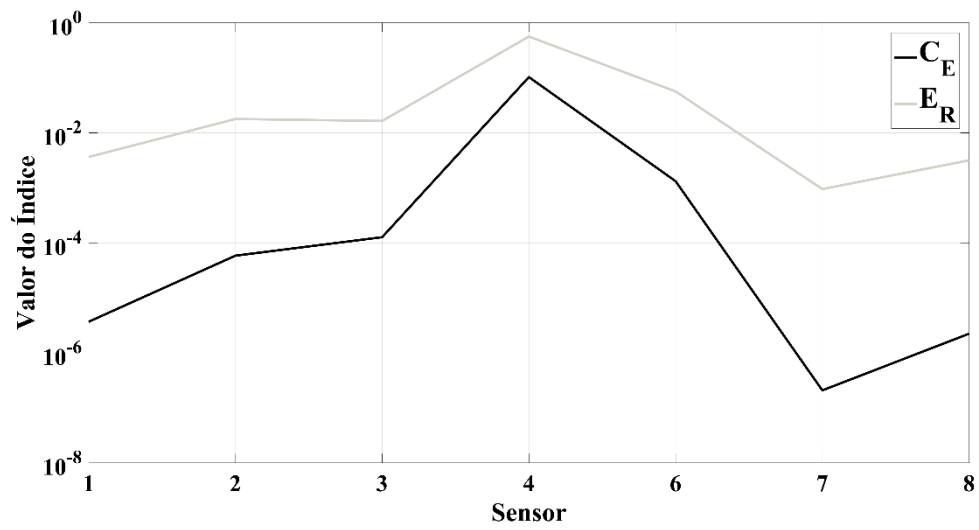


Figura 9

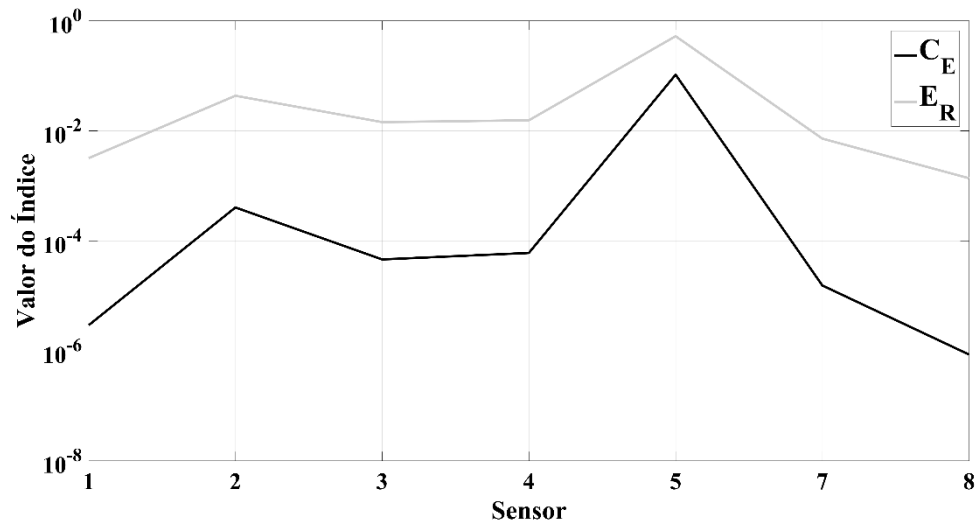


Figura 10

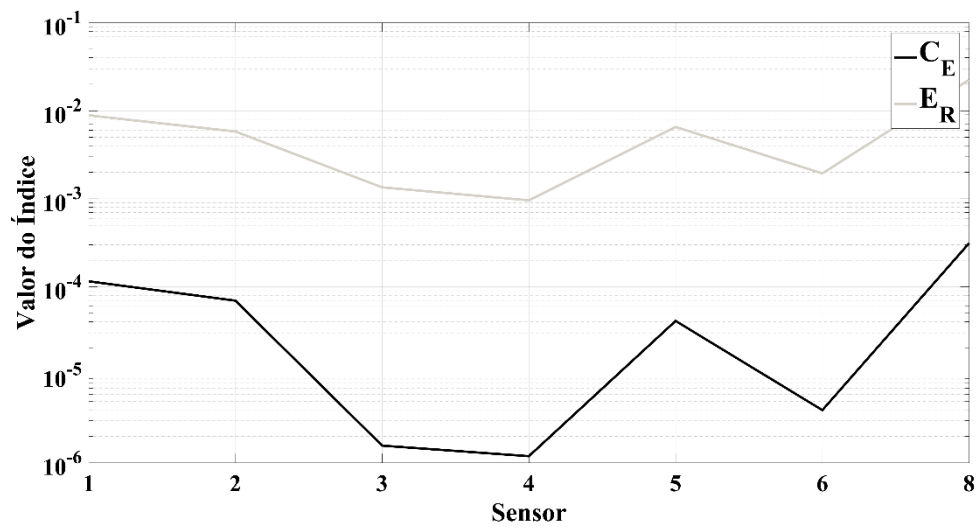


Figura 11

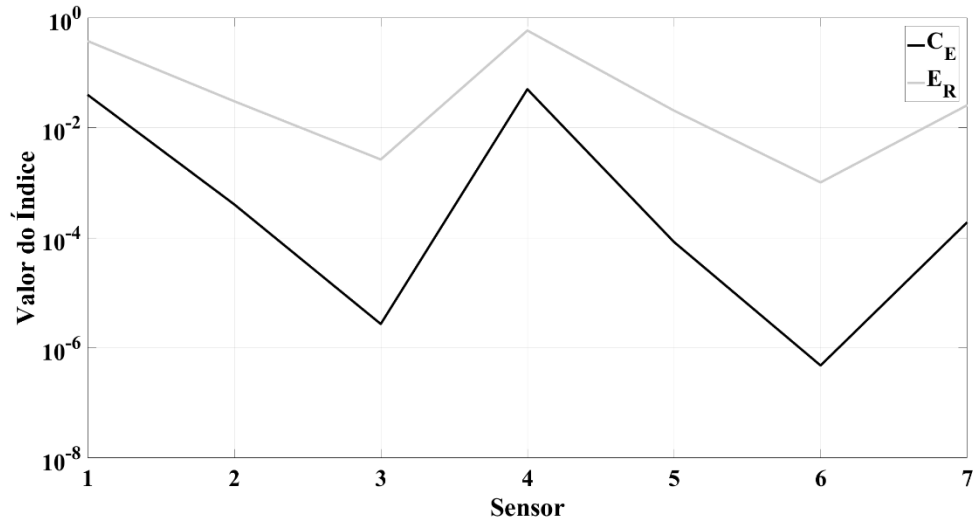


Figura 12

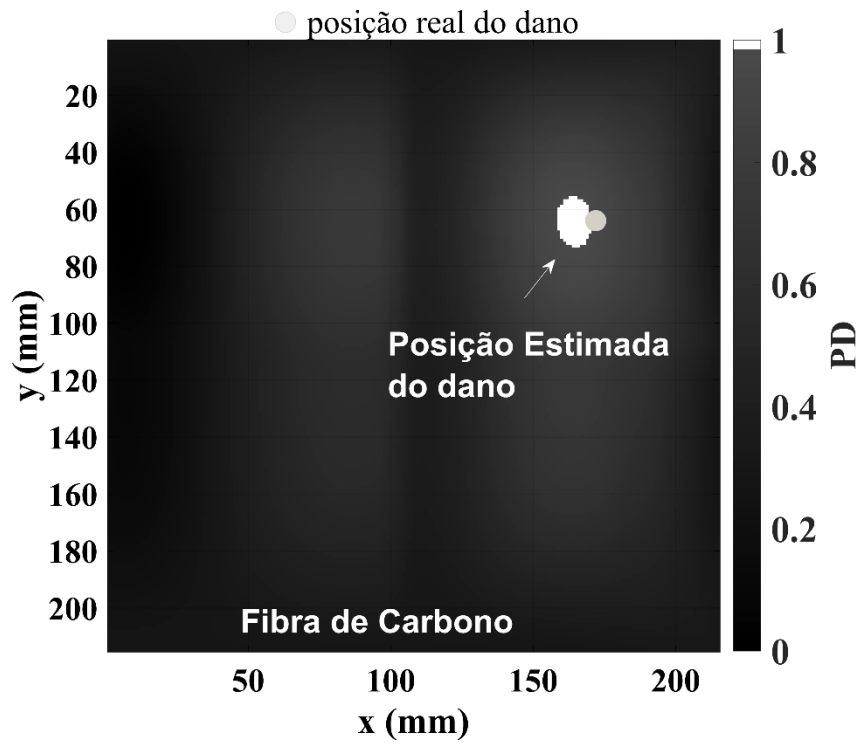
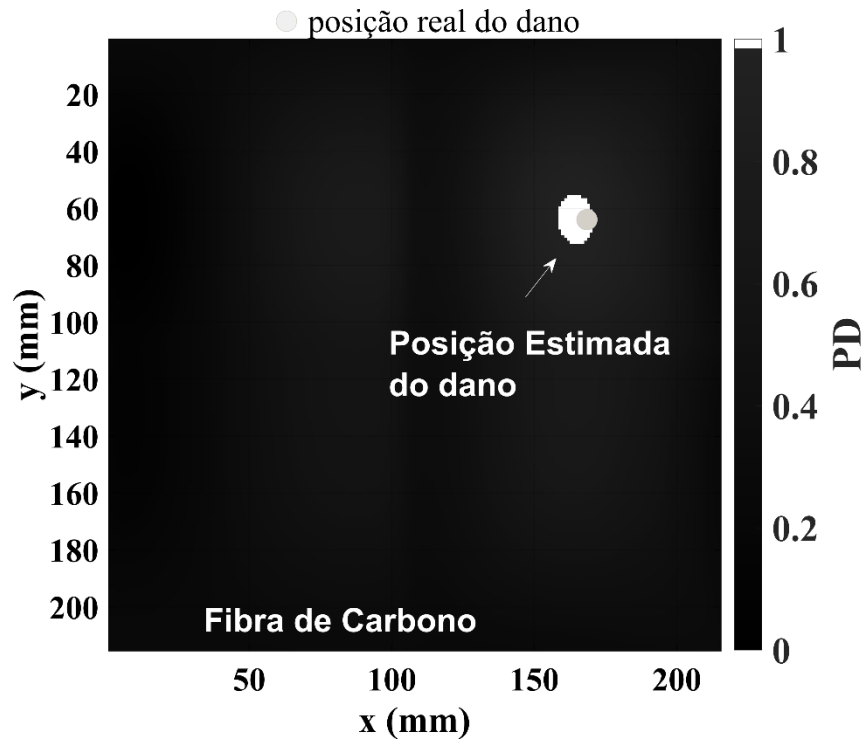


Figura 13



RESUMO

TÉCNICA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA E O CONCEITO DE ENERGIA

A presente invenção se refere a uma nova técnica de monitoramento, diagnóstico e localização de danos em materiais utilizando o algoritmo proposto e transdutores piezelétricos. A técnica apresentada é capaz de detectar e localizar um dano por meio da construção de uma imagem em que cada pixel é o valor da probabilidade da ocorrência de um dano.