

DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE DANOS CAUSADOS POR IMPACTOS EM PLACAS DE MATERIAL COMPOSTO UTILIZANDO O MÉTODO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

RODRIGO REBELLO RIBEIRO ABRAHÃO¹, DOMINGOS ALVES RADE²

RESUMO

Atualmente, os materiais compostos vêm substituindo os materiais tradicionais, principalmente em aplicações que exigem melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. No entanto, estes materiais apresentam mecanismos de dano complexos que podem ser difíceis de detectar em estágios iniciais. Os danos podem ocorrer durante a fabricação ou utilização, ou mesmo durante a manutenção. Em estruturas aeronáuticas, as maiores causas de dano estão ligadas a objetos que colidem com a estrutura, como a colisão de pássaros, granizos, pedras na pista de pouso/decolagem e por ferramentas durante a manutenção. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é o de avaliar o uso de uma técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada no conceito de impedância eletromecânica para a detecção e quantificação de danos causados por impactos de baixa energia em placas de material composto. O método da impedância eletromecânica é uma técnica não destrutiva que utiliza o acoplamento eletromecânico de materiais piezoelétricos colados à superfície da estrutura monitorada. Os ensaios experimentais foram planejados de forma a cobrir uma faixa relativamente ampla de condições de teste, notadamente no tocante à energia de impacto e dimensão da peça impactadora e às condições de impactos simples e múltiplos. Também foram examinadas as influências da faixa de frequências na qual a função de impedância é adquirida e do posicionamento dos transdutores piezoelétricos quer na face impactada, quer na face oposta à impactada. Os resultados dos testes experimentais revelam que a técnica da impedância eletromecânica é capaz de detectar a presença de danos causados por impactos, tanto simples como múltiplos, e de distinguir, em significativa parte dos casos, os diferentes graus de severidade do dano produzido nas diversas condições de teste. Adicionalmente, foram construídos metamodelos estatísticos para o estabelecimento de relações entre as energias de impacto e a métrica de dano em ensaios de impactos simples e múltiplos.

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, nº 2121, CEP: 38400-902, Uberlândia – MG – Brasil, rebello@ymail.com

²Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, nº 2121, CEP: 38400-902, Uberlândia – MG – Brasil, domingos@ufu.br

PALAVRAS CHAVE

Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Impacto de baixa energia, Materiais Compostos.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF COMPOSITE PLATES SUBJECTED TO IMPACTS USING THE ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE TECHNIQUE

ABSTRACT

Currently, the composite materials are replacing the traditional materials, mainly for applications that require better performance, security, economy and durability. However, these materials have complex mechanisms of damage that may be difficult to detect in the early stages. The damage may occur during the manufacture or use, or even during maintenance. In aeronautical structures, the biggest causes of damage are associated with objects that collide with the structure, as the collision of birds, hail, stones on the track, landing / takeoff and tools during maintenance. In this context, the objective of this work is to evaluate the use of a technique for structural health monitoring based on the concept of electromechanical impedance for the detection and quantification of damage caused by impacts of low energy in plates of composite material. The method of electromechanical impedance is a non-destructive technique that uses electromechanical coupling of piezoelectric material glued to the surface of the structure monitored. The experimental tests are planned in such a way to encompass a relatively broad range of test conditions, as related to impact energy and dimension of the impacting piece as well as the condition of single or multiple impacts. Were also examined the influences of the band of frequencies in which the function of impedance is gained and the positioning of piezoelectric transducers on the face or impacted, either on the face opposite the impacted. The test results show that the experimental technique of impedance electromechanical is able to detect the presence of damage caused by impacts and to distinguish, in significant part of the cases, the different degrees of severity of the damage produced in the various test conditions. Additionally, statistical metamodels were built aiming at establishing functional relations between the values of the damage metric and impact energy for single and multiple impacts.

KEY WORDS

Structural Health Monitoring, Impedance-based Monitoring, Low-energy Impact, Composite Materials.

INTRODUÇÃO

Para a revisão bibliográfica, realizou-se um levantamento de técnicas de monitoramento de integridade estrutural, enfatizando a técnica de impedância eletromecânica, além de uma pesquisa sobre testes de impacto em materiais compostos. Da mesma forma, também foram estudadas técnicas de modelagem estatística e planejamento de experimentos.

Os diversos tipos existentes de sistemas estruturais estão inevitavelmente sujeitos a carregamentos e influências ambientais que podem levar à ocorrência de danos que, por sua vez, podem comprometer a segurança e a eficiência operacional.

Segundo Farrar et al. (2003), *dano*, no contexto de sistemas mecânicos e estruturais, é definido como sendo modificações intencionais ou não intencionais das propriedades físicas e/ou geométricas do sistema, incluindo modificações nas condições de contorno e na conectividade, as quais podem comprometer o funcionamento atual ou futuro do sistema. Dependendo do tipo de dano, sua influência pode ser sentida imediatamente ou a partir de certo instante posterior à sua ocorrência. Além do comprometimento do funcionamento, em termos de eficiência operacional, aspectos relacionados à segurança tornam-se *pri-mordiais*, sobretudo quando a existência de danos implica na ocorrência de falhas catastróficas que podem levar a ferimentos, mortes, traumas psíquicos, danos ambientais e perdas econômicas.

No caso de sistemas mecânicos, o dano pode se apresentar sob diferentes formas, dentre as quais algumas das mais frequentes são trincas, deformações excessivas, ruptura ou afrouxamento de elementos de ligação, desgaste e corrosão.

As boas práticas de projeto de Engenharia buscam evitar a ocorrência de alguns tipos de dano mediante o correto dimensionamento dos componentes estruturais para suportar as condições de funcionamento previstas. Todavia, em muitos casos, estas práticas, embora necessárias, não são suficientes para impedir a ocorrência de falhas e suas conseqüências, uma vez que:

- Nos casos reais, as propriedades mecânicas dos materiais empregados e os carregamentos a que os sistemas estão sujeitos não são perfeitamente conhecidos, estando

sujeitos a variabilidades que podem ser tratadas em um contexto probabilístico. A existência destas variabilidades conduz ao conceito de confiabilidade, entendida como a probabilidade de que o sistema venha desempenhar suas funções sem a ocorrência de falhas, sob condições normais de operação, em um determinado intervalo de tempo (Melchers, 1999). De modo geral, um aumento da confiabilidade está associado a um aumento dos custos, de modo que, na prática, os projetos de Engenharia buscam um compromisso adequado entre estes dois critérios, o que inevitavelmente deixa margens para a ocorrência de falhas durante a vida útil do sistema;

- Em muitos casos, os sistemas ficam sujeitos a eventos de baixa probabilidade que não são considerados nas fases de projeto e dimensionamento. Adicionalmente, deve-se levar em conta que vários produtos industriais são projetados e construídos para funcionar dentro de alguns limites que, uma vez excedidos, podem resultar em danos. Assim, por exemplo, aeronaves são projetadas para operação dentro de “envelopes” que, em função da categoria do aparelho, delimitam as manobras permitidas, a carga máxima transportada, e impõem outras restrições operacionais.

Diante do interesse de aumentar a confiabilidade de sistemas estruturais de alta responsabilidade e, ao mesmo tempo, diminuir os custos de manutenção, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas nas últimas duas décadas, baseadas na observação de parâmetros estruturais que podem ser relacionados à presença de danos. Em particular, as chamadas técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*), têm recebido especial interesse. De acordo com Farrar et al. (2003), entende-se por Monitoramento de Integridade Estrutural como o processo de detecção de danos que envolvem a observação de um sistema ao longo do tempo usando medições de respostas dinâmicas amostradas periodicamente a partir de uma malha de sensores, seguida da extração de características sensíveis ao dano destas respostas e do tratamento estatístico destas características para determinação do estado corrente do sistema no que diz respeito ao dano.

Pode-se ainda subdividir o monitoramento de integridade estrutural em duas sub-etapas:

- a) A detecção da presença de dano, propriamente dita entendida como a identificação da ocorrência de um evento discreto ou o início de um evento contínuo associado ao dano;
- b) A quantificação da magnitude do dano, que visa avaliar a intensidade da modificação estrutural associada ao dano.

Farrar et al. (2003) definem ainda o Monitoramento de Uso, ou ainda *Usage Monitoring*, que consiste no processo de medição das respostas e, em alguns casos, das excitações aplicadas em um sistema estrutural durante seu funcionamento.

Outro processo de grande interesse, complementar ao Monitoramento de Integridade Estrutural, é o chamado Prognóstico de Dano (*Damage Prognosis*), que visa estimar a vida útil de componentes estruturais sujeitos ao dano. Este processo é conduzido com base em modelos preditivos, integrando informações obtidas pelo Monitoramento de Uso e Monitoramento de Integridade Estrutural, conhecimento de condições ambientais e operacionais passadas e presentes, e estimativas das condições futuras previstas.

Segundo Farrar et al. (2003), o problema de Monitoramento de Integridade Estrutural é, essencialmente, um problema de *reconhecimento estatístico de padrões*, que segue um paradigma descrito como um processo composto de quatro etapas:

- (1) Avaliação operacional;
- (2) Aquisição, fusão e depuração de dados;
- (3) Extração de características e condensação de informações;
- (4) Desenvolvimento de modelos estatísticos para discriminação de características.

Estas etapas são descritas a seguir.

Avaliação operacional

A avaliação operacional responde às seguintes questões relacionadas com a implementação de um sistema de monitoramento de integridade estrutural:

- 1) quais são os motivos (de natureza econômica ou de segurança) que justificam a realização do monitoramento?
- 2) como é definido o dano para o sistema a ser monitorado?
- 3) quais são as condições operacionais e ambientais sob as quais o sistema a ser monitorado irá funcionar?
- 4) quais são as limitações da aquisição de dados durante a operação do sistema?

Aquisição, fusão e depuração de dados

A etapa de aquisição de dados no processo de monitoramento de integridade estrutural envolve a escolha das grandezas a serem medidas, bem como o número e tipos de sensores a serem utilizados, sua localização, resolução, faixa de operação, e demais características do

sistema de aquisição, armazenagem e transmissão de dados. Nesta etapa, considerações de ordem econômica são primordiais. Além disso, considerando que geralmente os dados são adquiridos ao longo de intervalos de tempo amplos, é importante que as medições possam ser normalizadas, de modo que as variações das respostas dinâmicas do sistema possam ser separadas das influências das alterações das condições operacionais e ambientais ocorridas durante o intervalo de medição.

A fusão de dados visa integrar as medições obtidas através de vários sensores para aumentar o grau de confiança nas decisões que serão tomadas a partir destas medições.

A depuração de dados consiste na aceitação ou rejeição de medidas a serem utilizadas no processo de monitoramento de integridade estrutural.

Extração de características e condensação de dados

A extração de características consiste em identificar valores de propriedades que são sensíveis à presença de danos, a partir das respostas estruturais medidas, as quais permitem distinguir entre os estados, “intacto” e “danificado”.

A condensação de dados visa reduzir a quantidade de dados disponíveis, de modo a eliminar redundâncias e facilitar a tomada de decisão com base em um número reduzido de características significativas.

Desenvolvimento de modelos estatísticos para discriminação de características

Esta etapa é relacionada com a implementação de algoritmos numéricos que operam sobre as características extraídas das respostas estruturais para quantificar o estado do sistema no tocante ao dano. Conforme ressaltam Farrar et al. (2003), este processo é tipicamente de reconhecimento de padrões, e pode ser classificado em dois tipos principais: *aprendizado supervisionado*, quando o processo opera sobre conjuntos de características do sistema em diversos cenários: intacto e danificado; *aprendizado não supervisionado*, quando o reconhecimento de padrões não é baseado sobre características obtidas em diferentes cenários do sistema danificado.

A completa caracterização do dano é feita respondendo às seguintes perguntas:

- 1) Ocorreu dano no sistema? (detecção);
- 2) Onde se localiza o dano? (localização);
- 3) Qual tipo de dano ocorreu? (classificação);

- 4) Quão severo é o dano? (quantificação);
- 5) Qual a vida útil residual do sistema? (prognóstico).

Foram desenvolvidas várias técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural que operam sobre diferentes tipos de grandezas mecânicas. Todas elas apresentam vantagens e inconvenientes, havendo alguns fatores que, reconhecidamente, delimitam suas potencialidades e devem ser adequadamente considerados quando da escolha da técnica a ser empregada. Dentre elas, duas das mais importantes são:

- 1) A sensibilidade das respostas dinâmicas e das características delas extraídas em relação à presença e intensidade do dano. Como todas as medições de grandezas físicas em condições reais de serviço envolvem vários tipos de imprecisões e incertezas, é indispensável que as variações das características, provocadas pelo dano, sejam de magnitudes superiores a estas imprecisões e incertezas.

- 2) A sensibilidade das medidas em relação a influências ambientais e a variações das condições operacionais. Principalmente nos casos em que as medições devem ser feitas em um longo período de tempo, é indispensável que as medidas efetuadas apresentem baixa sensibilidade em relação a variações ambientais e operacionais, de modo a que a influência do dano possa ser observada nas características dinâmicas.

Existem várias técnicas destinadas ao monitoramento da ocorrência e propagação de danos estruturais, que se baseiam em diferentes princípios, desde a inspeção visual, ao uso de raios-x e ultra-som. Todavia, seu uso prático é limitado pelo fato que a inspeção é localizada, o que torna estes métodos demorados e onerosos.

Mais recentemente, foram desenvolvidos métodos de monitoramento baseados no uso de materiais ditos inteligentes (Giurgiutiu, 2000). Há hoje um conjunto de técnicas, que vêm sendo utilizadas com sucesso, baseadas no uso de transdutores piezelétricos para a excitação da estrutura e captura de respostas dinâmicas. As características vantajosas destas técnicas são as seguintes:

- 1) Os transdutores piezelétricos são pouco intrusivos, podendo ser confeccionados em diferentes formas e tamanhos, podendo ainda ser colados nas superfícies ou mesmo inseridos no volume de componentes estruturais. Esta característica oferece uma grande flexibilidade de projeto do sistema de transdução;

- 2) Possibilitam excitação e medições em amplas faixas de frequência, abrangendo ordens de grandeza de DC (Decibéis) a MHz (Megahertz), o que permite excitar um grande número de modos de vibração e, em particular, movimentos com pequenos comprimentos de onda. Esta característica possibilita a identificação de danos de pequena extensão;

3) Apresentam relativa insensibilidade a fatores ambientais, tais como temperatura e umidade.

Particularmente no tocante aos transdutores piezelétricos, a técnica baseada na impedância eletromecânica vem sendo amplamente estudada, sendo considerada uma das mais promissoras (Su et al., 2006). Esta técnica baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de um transdutor piezelétrico à estrutura monitorada, ficando definida a função de impedância que depende tanto das características elétricas do transdutor quanto das características físicas (inércia e rigidez) da estrutura. Assim, através de curvas características da impedância, variações da rigidez e de massa da estrutura, decorrentes do aparecimento de falhas, podem ser avaliadas. Como a perda de rigidez progressiva está intimamente relacionada com o processo de falha estrutural, faz-se tal correlação utilizando ferramentas numéricas e estatísticas (Davis & Mandfield, 2002; Kabeya, 1998; Raju, 1997).

No tocante aos tipos de sistemas estruturais e materiais aos quais as técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural podem ser aplicadas, variados tipos de sistemas estruturais de engenharia que envolve altos riscos e custos de manutenção têm sido objeto de aplicação, notadamente: estruturas de construção civil (pontes, edifícios, torres de telecomunicações), estruturas de aeronaves, estruturas *off-shore*, tubulações da indústria petroquímica e veículos de entretenimento (montanhas russas, por exemplo). De acordo com Farrar et al. (2003) são os aspectos econômicos e de segurança que impulsionam o desenvolvimento da tecnologia de monitoramento de integridade estrutural.

A maioria dos sistemas estruturais mencionados acima é constituída de materiais metálicos, principalmente ligas ferrosas e de alumínio, cujos modos de falha são razoavelmente bem caracterizados atualmente. Entretanto, devido à sua tipicamente elevada razão resistência / peso, além de outras características favoráveis, tem sido observada uma crescente utilização dos chamados materiais compostos em diversos tipos de sistemas estruturais, principalmente na indústria aeronáutica.

Um material composto resulta da combinação macroscópica de dois ou mais materiais diferentes, havendo uma interface entre estes, para funcionar como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum componente individualmente apresenta (Mendonça, 2005). Em virtude desta composição, os materiais compostos são heterogêneos e, na maioria das vezes, apresentam comportamento mecânico anisotrópico.

Os materiais compostos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais metálicos tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. No entanto, devido à

sua natureza intrinsecamente heterogênea e anisotrópica, os mecanismos de falha dos materiais compostos são muito mais complexos que os mecanismos de falha dos materiais metálicos, fato que conduz a novos desafios para o seu projeto e manutenção. Assim sendo, dado o crescente interesse no uso de materiais compostos em diversos setores da indústria, notadamente no setor aeroespacial, no qual os requisitos de segurança são extremamente rigorosos, especial interesse tem sido dedicado ao uso de técnicas de monitoramento da integridade de estruturas constituídas por este tipo de material (Grondel et al., 2004).

A literatura revela que, devido aos elevados custos de manutenção envolvidos e aos estritos requisitos de segurança, as necessidades da indústria aeronáutica têm sido umas das principais impulsionadoras da incorporação de técnicas de monitoramento de integridade estrutural no setor industrial. Não obstante, é curioso observar que Bartelds (1997) acredita que, no âmbito da indústria aeronáutica, os requisitos de segurança não justificam o desenvolvimento de técnicas de monitoramento de integridade estrutural, uma vez que as normas existentes de projeto e certificação já garantem níveis extremamente altos de confiabilidade estrutural.

Em estruturas aeronáuticas as maiores causas de dano estão ligadas a objetos que colidem com a estrutura, pássaros, granizo, pedras, detritos na pista durante o pouso ou a decolagem, veículos durante as operações de carregamento e descarregamento de bagagens e cargas, e ferramentas durante a manutenção da aeronave (Moulin et al., 1997).

No caso de componentes construídos em materiais compostos, os impactos de baixa energia podem resultar em danos de pequena extensão localizados no interior do volume do material (ruptura de fibras, delaminação, por exemplo), que são imperceptíveis a olho nu e de difícil detecção por algumas técnicas de monitoramento de integridade estrutural. Este fato demanda o emprego de técnicas adequadas para este tipo de situação, dentre as quais se inclui a técnica baseada na impedância eletromecânica.

Impedância Eletromecânica e seu Monitoramento Estrutural

A técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada em impedância utiliza pequenas pastilhas de cerâmica piezoelétrica PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), que atuam como sensor e atuador, coladas ou incorporadas na estrutura em questão para conduzir o monitoramento. O efeito sensor, também chamado “efeito direto”, fica caracterizado quando o material submetido a uma carga mecânica externa, produz uma distribuição de cargas elétricas em sua superfície. Por outro lado, o efeito atuador, ou “efeito inverso”, implica que o material

piezolétrico sujeito a um potencial elétrico externo, desenvolve deformações geométricas. Esta característica, associada aos conceitos de impedância elétrica e falha métrica, permite a localização e o monitoramento da falha.

Dentro de um material piezolétrico, a tensão mecânica, a deformação, o campo elétrico e o deslocamento elétrico, podem ser completamente descritos por um par de equações eletromecânicas. A relação definida por (Cawley et al., 1984) que descreve o acoplamento entre as variáveis elétricas e mecânicas são descritas pelas Equações 1 e 2, as quais representam, respectivamente, o efeito inverso e direto do PZT.

$$S_i = s^E_i T_j + d_m E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_m T_j + \varepsilon^T_{mk} E \quad (2)$$

Ou na forma Matricial:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

S : vetor das deformações [m/m];

T : vetor das tensões [N/m²];

E : vetor campo elétrico [V/m];

D : vetor deslocamento elétrico [C/m²];

s : tensor de flexibilidade [m²/N];

d : tensor das constantes piezolétricas em deformação [m/V];

ε : permissividade elétrica [F/m].

Os índices i, j e m indicam as direções da tensão e da deformação e o índice k a do campo elétrico.

Este método combina dois tipos de impedância: a impedância mecânica e a impedância elétrica. A impedância mecânica de um sistema pode ser definida como a relação entre a força harmônica aplicada a este sistema e a velocidade com que o mesmo se desloca no mesmo ponto (Raju, 1997). A impedância elétrica consiste na oposição que um circuito ou componente oferece à corrente alternada. Esta é uma grandeza complexa, portanto, dividida em duas partes: resistência e reatância. No sistema combinado estrutura-PZT a impedância

eletromecânica do sistema é medida e supondo que a impedância elétrica do sistema não varie, toda variação é atribuída somente à parte mecânica, sendo esta proveniente das alterações geométricas da estrutura ou pela alteração das propriedades mecânicas que, indiretamente, caracterizam a evolução do dano.

O monitoramento da estrutura é realizado aplicando um campo elétrico alternado no PZT, colado na mesma. Dessa forma, o PZT se deforma conjuntamente com a estrutura fazendo com que o conjunto vibre. Como as frequências de excitação são muito altas, a resposta dinâmica da estrutura atua em uma pequena região próxima ao PZT. A resposta da vibração mecânica é transferida de volta para o PZT em forma de resposta elétrica. Quando algum tipo de dano ou uma fissura aparecem na estrutura, a resposta dinâmica da mesma é alterada (alteração da fase, da frequência ou da magnitude) e percebida através da resposta elétrica do PZT.

Um modelo simples, como mostrado na Figura 1, pode descrever a interação entre um PZT e a estrutura a ele vinculada. O PZT é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta a aplicação de tensão elétrica alternada. Uma extremidade é fixada e a outra é conectada na estrutura, representando um sistema com um grau de liberdade.

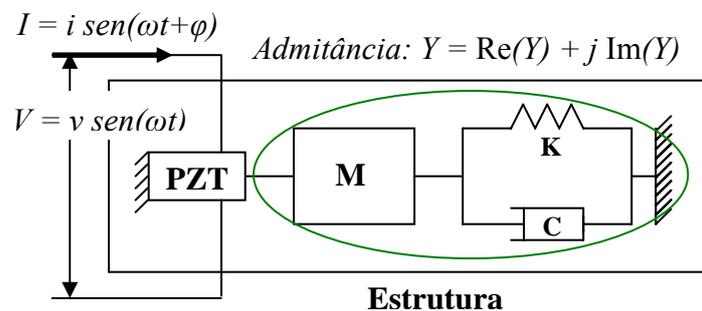


Figura 1: Modelo unidimensional utilizado para representar a pastilha piezoelétrica – sistema dinâmico estrutural.

onde:

K : parâmetro de rigidez.

M : parâmetro de inércia.

C : parâmetro de amortecimento.

V : voltagem de entrada no atuador PZT.

Partindo do pressuposto de que as propriedades mecânicas do PZT não variam com o tempo em que o mesmo é utilizado para o monitoramento estrutural, Liang et al (1994)

demonstraram que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT $Z_a(\omega)$, e da estrutura, $Z(\omega)$, sendo dada por:

$$Y(\omega) = \frac{1}{V} = i\omega a \left(\bar{\varepsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (4)$$

onde:

$Y(\omega)$: admitância elétrica do atuador PZT (inverso da impedância);

$Z_a(\omega)$: impedância mecânica do PZT;

$Z(\omega)$: impedância mecânica da estrutura;

V : voltagem de entrada no atuador PZT;

I : corrente de saída do PZT;

a : constante geométrica do PZT;

\hat{Y}_{xx}^E : módulo de Young;

d_{3x} : constante de acoplamento piezelétrico;

$\bar{\varepsilon}_{33}^T$: constante dielétrica complexa do PZT;

δ : fator de perda dielétrica do PZT.

A função de impedância é uma função complexa de frequência, que pode ser representada de diferentes formas (parte real e parte imaginária *versus* frequência, amplitude e fase *versus* frequência). Sua aquisição é feita com o auxílio de equipamento experimental apropriado, denominado analisador de impedância ou impedancímetro, que gera o sinal de excitação, adquire o sinal de resposta e processa numericamente os dois sinais para a obtenção da função de impedância na faixa de frequências de interesse. Normalmente o método utiliza altas frequências (maiores que 20Hz), e pequenas voltagens (<1V) que são aplicadas ao PZT.

A detecção e a avaliação da intensidade do dano são feitas com base na comparação entre as funções de impedância medidas antes e após a ocorrência do dano. A comparação visual destas funções não é suficiente, havendo necessidade de se empregarem critérios quantitativos para este efeito. Neste sentido, definem-se as chamadas *métricas de dano*, que são parâmetros escalares que representam globalmente as diferenças entre duas funções de

impedância. A métrica mais frequentemente empregada é a raiz média quadrática, introduzida por Sun *et al.* (1995), definida: segundo:

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\operatorname{Re}(Z_{i,1}) - \operatorname{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\operatorname{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (5)$$

onde:

M: representa a medida da falha;

$Z_{i,1}$: representa o PZT medido sob condições iniciais;

$Z_{i,2}$: representa o sinal a ser comparado, para o i -ésimo valor da frequência;

n : indica o número de frequências na banda de observação.

Objetivos e Metodologia de Trabalho

Tendo por motivação as necessidades da indústria aeronáutica, e estando inserido no contexto das técnicas de monitoramento de integridade estrutural baseadas no uso de transdutores piezelétricos, o trabalho de pesquisa tem por objetivo geral a avaliação da técnica da Impedância Eletromecânica para a identificação de danos causados por impactos de baixa energia em materiais compostos.

A metodologia adotada é constituída das seguintes etapas principais:

1) Projeto e construção de um dispositivo de estrutura pendular destinado à realização de ensaios de impacto com energia controlada, na faixa de interesse da indústria aeronáutica para a simulação de impactos causados por quedas de ferramentas durante operações de manutenção;

2) Confecção de corpos de prova retangulares obtidas a partir de corte de uma placa de material composto de epóxi/fibra de carbono, de uso aeronáutico, fornecida pela EMBRAER;

3) Realização de ensaios de impacto nos corpos de prova com diferentes energias e realização de medições de impedância eletromecânica antes e após os impactos;

4) Processamento estatístico dos sinais de impedância adquiridos para avaliação da chamada métrica de dano, que permite estabelecer uma correlação entre os sinais de impedância e a presença e severidade do dano;

5) Análise dos dados obtidos com vistas à avaliação dos seguintes aspectos: i) capacidade da técnica da impedância eletromecânica para identificar danos de impacto em

materiais compostos, de modo geral; ii) influência da energia de impacto sobre a capacidade de identificação da técnica da impedância eletromecânica.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis - LMEst, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, com o apoio da EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. Este constitui uma extensão da experiência prévia do grupo de pesquisa do LMEst acerca da técnica da impedância eletromecânica, mediante sua aplicação a materiais compostos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nos ensaios experimentais será descrita a seguir, incluindo o projeto e construção do dispositivo concebido para aplicação de impactos nos corpos de prova.

Descrição dos corpos de prova e equipamento experimental

Para a realização do ensaio foi necessária a construção de um dispositivo de configuração pendular, mostrado na Figura 2, o qual permite obter valores desejados da energia de impacto mediante a variação da altura a partir do qual o pêndulo é liberado, a massa da haste, além de massas adicionais confeccionadas sob a forma de discos de massa conhecida que podem ser fixados à extremidade da haste do pêndulo, com valores dispostos na Tabela 1.

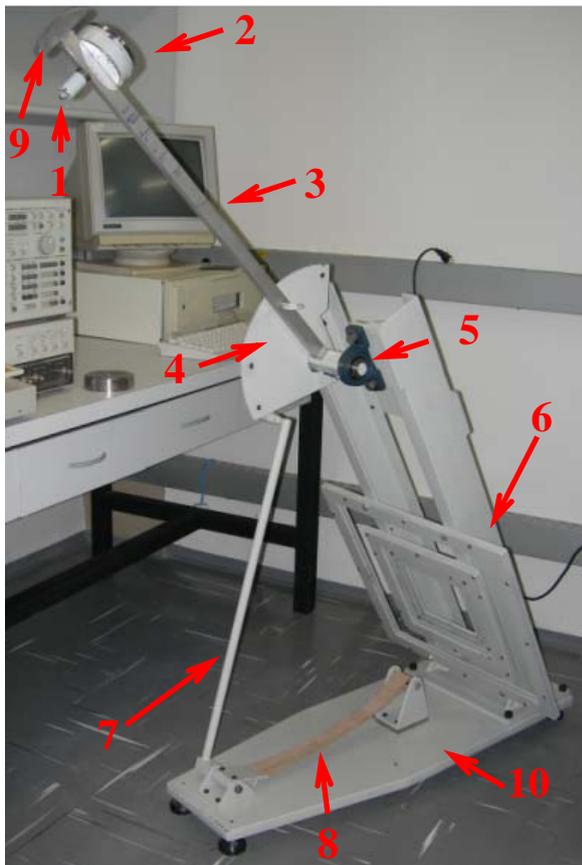
Tabela 1: Valores das massas extras utilizadas no aparato experimental.

| | Massas Extras | | | | | |
|------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Número | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Massa (Kg) | 0.317 | 0.492 | 0.794 | 0.904 | 0.568 | 0.394 |

As placas de material composto são fixadas ao aparato por meio de molduras confeccionadas com cantoneiras de aço presas por parafusos no aparato. Diferentes molduras foram confeccionadas de modo a possibilitar a fixação de corpos de prova de diversas dimensões, a saber: 20×20cm², 30×30cm² e 50×50cm².

Os corpos de prova, com dimensões

200mm×200mm, foram cortados com serra de fita a partir de uma placa quadrada de dimensões 1000mm×1000mm, 3,04mm de espessura e massa de 4,720kg. Esta placa é constituída por fibras de carbono e resina epóxi (35% do peso), com temperatura de cura de 180°C. A disposição da estratificação das 16 camadas do composto é [0/45/-45/90/0/45/-45/90]_{2s}. Nos corpos de prova foram coladas quatro pastilhas piezelétricas (duas em cada face) com dimensões 10mm×10mm e 0,127mm de espessura, sobre uma circunferência de 65mm de raio, centrada no ponto central da placa no qual ocorre o impacto (Figura 3).



LEGENDA:

1. Ponteira de impacto
2. Massas adicionais
3. Haste do pêndulo
4. Marcador de posição angular da haste do pêndulo
5. Mancal de rolamentos
6. Quadros de fixação dos corpos de prova
7. Haste do freio
8. Correia do freio
9. Sapata do freio
10. Base de aço

Figura 2: Dispositivo pendular para aplicação de impactos.

A seguir a descrição dos ensaios de impacto com baixa energia nos corpos de prova confeccionados com material composto. Os corpos de prova serão impactados utilizando o sistema pendular, com energias crescentes. Para cada impacto realizado, serão adquiridos os sinais de impedância eletromecânica utilizando um analisador de impedância HP 4194A.

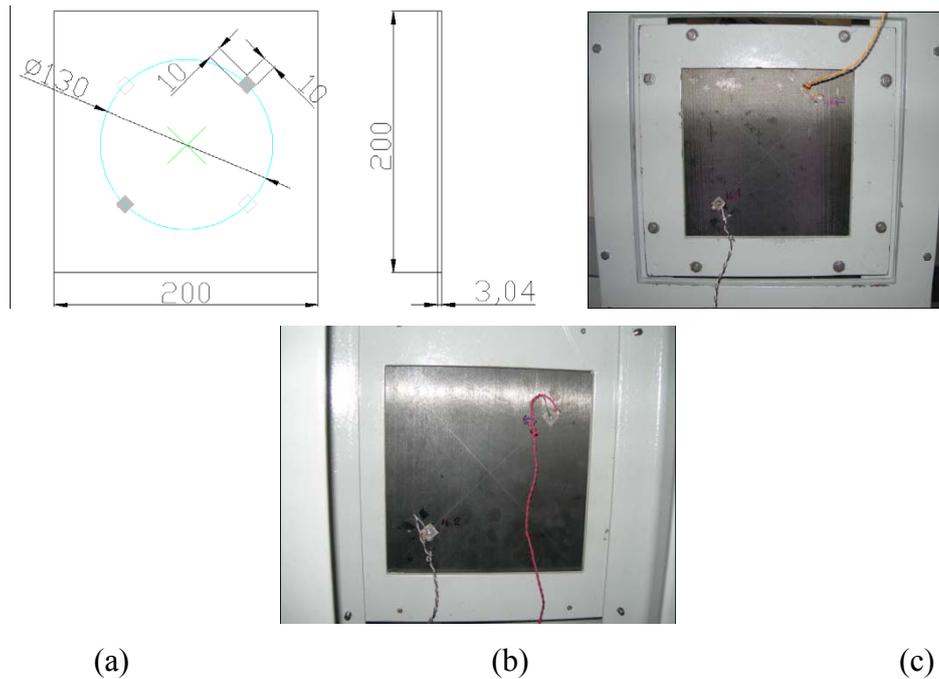


Figura 3: Posicionamento das pastilhas piezelétricas nos corpos de prova: (a) Dimensões e localização das pastilhas piezelétricas (em mm), (b) face frontal, onde ocorre o impacto e (c) face posterior.

Realização dos ensaios de impacto e aquisição dos sinais de impedância

Os ensaios são realizados de forma que as condições de impacto, em termos da energia associada e a dimensão da zona impactada representem colisões típicas mostradas na Tabela 2, com base em normas internas utilizadas pela EMBRAER.

Na Tabela 2, a geometria da peça de impacto, o formato esférico tem diâmetro mínimo de 25,4 mm e a agudo possui formato cônico.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros adotados para o ensaio de cada um dos 18 corpos de prova, podendo ser observado que dez placas são ensaiadas com impactos simples e oito corpos são ensaiados com impactos múltiplos, em número de três, com mesmos valores de energia. Os cálculos das energias empregadas no impacto são efetuados com base no Princípio da Conservação da Energia Mecânica.

Tabela 2 – Situações típicas de colisão.

| Ferramenta | Massa (kg) | Altura (m) | Energia (J) | Geometria | |
|---|------------|------------|-------------|-----------|-------|
| | | | | Esférica | Aguda |
| Máquina de apertar e desapertar parafusos | 1 | 0,5 | 5 | | X |
| Lixadeira | 1,8 | 0,5 | 9 | X | |
| Martelo | 0,4 | 1,5 | 6 | X | |
| Peças pequenas | 0,5 | 1,5 | 7 | | X |
| Régua de metal | 0,3 | 1 | 3 | | X |
| Alicate | 0,5 | 1,5 | 7 | | X |
| Paquímetro | 0,3 | 1 | 3 | | X |
| Ajustador da chave de boca | 1,2 | 1 | 12 | X | |
| Chave de boca | 1 | 1 | 10 | X | |
| Chave de fenda | 0,5 | 1,5 | 7 | | X |
| Chave catraca | 0,3 | 1,5 | 4 | X | |
| “Snapover” | 1 | 1 | 10 | X | |
| Rebitadeira do tipo POP | 2,5 | 1 | 25 | X | |
| “Back-up” | 1,5 | 0,5 | 7 | X | |
| “File” | 0,4 | 1,5 | 6 | X | |
| Morsa | 1,5 | 0,5 | 7 | X | |
| Rebitadeira do tipo Marteleto Pneumático | 2,5 | 1 | 25 | X | |
| Máquina de polimento | 14 | 1 | 137 | X | |
| Caixa de Ferramentas | 14 | 1 | 137 | | X |

Tabela 3: Valores de energia utilizados nos ensaios de impacto.

| | Diâmetro da Ponteira: 12,5mm | | Diâmetro da Ponteira: 25,4mm | |
|--------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| | Nº da Placa | Energia (J) | Nº da Placa | Energia (J) |
| Impacto Único | 1 | 4,61 | 10 | 4,61 |
| | 2 | 8,78 | 11 | 8,78 |
| | 3 | 15 | 12 | 15 |
| | 4 | 20 | 13 | 20 |
| | 5 | 69,68 | 14 | 69,68 |
| Impactos Múltiplos | 6 | 4,61 / 4,61 / 4,61 | 15 | 4,61 / 4,61 / 4,61 |
| | 7 | 8,78 / 8,78 / 8,78 | 16 | 8,78 / 8,78 / 8,78 |
| | 8 | 15 / 15 / 15 | 17 | 15 / 15 / 15 |
| | 9 | 20 / 20 / 20 | 18 | 20 / 20 / 20 |

Após impactação, os corpos de prova são retirados do dispositivo, e os sinais de impedância são adquiridos com um analisador de impedância HP4194A, com os corpos de prova suspensos em uma armação metálica, como mostrada na Figura 3. O armazenamento dos dados é realizado em um microcomputador, com auxílio de uma placa GPI-B. O analisador de impedância é configurado com os seguintes parâmetros: OSC Level (amplitude da voltagem aplicada): = 1 Volt; AVG (número de amostras para cálculo de média) = 32 e pontos frequenciais amostrados = 401. São utilizadas três bandas de frequência, de 20 kHz a 30 kHz, 35 kHz a 45 kHz e de 60 kHz a 80 kHz, que foram identificadas pelo método de tentativa e erro, ou seja, foram escolhidas as bandas de faixas com maior presença de “picos” e com maior sensibilidade a deformações.

Para os ensaios com impactos únicos, foram realizadas 20 medições dos sinais de impedância para cada faixa de frequência em cada pastilha piezelétrica, sendo realizadas 10 antes e 10 após o impacto nos corpos de prova.

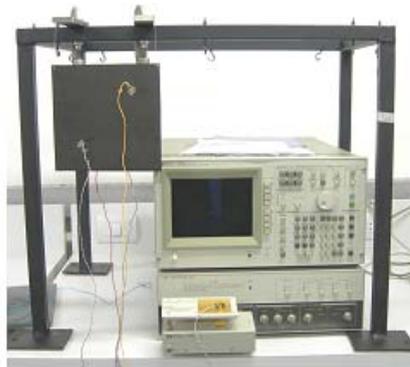


Figura 3 - Analisador de Impedância HP 4194A e sistema de fixação dos corpos de prova.

RESULTADOS

Após avaliação da capacidade de detecção de dano em cada corpo de prova utilizando o método da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural, foi ajustado um metamodelo visando correlacionar as métricas do dano com as energias de impacto.

As funções de impedância da placa antes e após o impacto foram obtidas computando-se as médias de 10 aquisições. Foram utilizadas as três faixas de frequências descritas. Para cada faixa de frequência, a métrica do dano foi computada de acordo com a Equação 5. Com o intuito de avaliar as influências dos ruídos e variações ambientais presentes nas medições, para cada condição de teste a métrica do dano foi calculada duas vezes: primeiramente a partir

de duas funções de impedância medidas sucessivamente para o corpo de prova antes do impacto (*baseline* × *baseline*) indicada por “baseline” e, em seguida, a partir de funções de impedância adquiridas antes e após o impacto (*baseline* × *dano*) indicada por “impacto”, de forma a avaliar a participação de incertezas não relacionadas com o dano no cálculo da métrica. Ensaaiaram-se as placas com impactos simples e múltiplos.

Impactos Simples

Ao se impactar a Placa 1 com uma energia de 4,61J e meia esfera de 12,5mm de diâmetro, verificou-se que não houve nenhuma falha visível, assim os valores das métricas foram similares. Da mesma forma, a placa 10 foi impactada com a ponteira de diâmetro 25,4mm de diâmetro e energia de 4,61J. Neste caso é possível constatar a ocorrência de pequenas variações nestas e nos diagramas de caixa, observa-se que o valor da métrica após o impacto é maior que o valor da métrica antes do impacto, indicando que o método foi capaz de detectar essa energia de impacto de 4,61J.

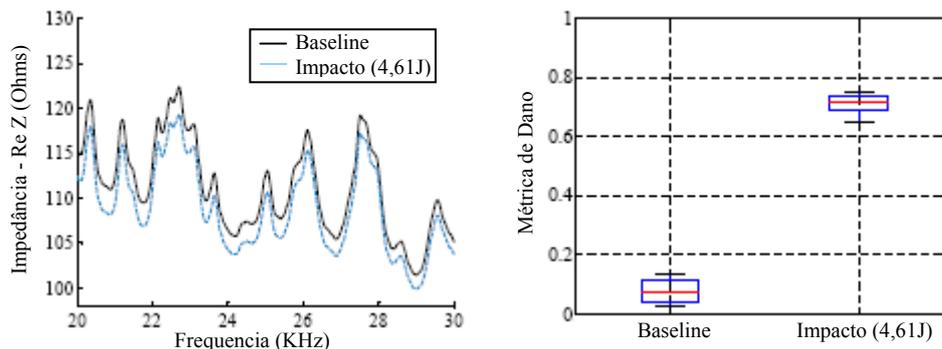


Figura 6: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 10, impactada com ponteira $\phi=25,4\text{mm}$ e energia $E=4,61\text{J}$ na banda de frequência de 20KHz a 30KHz.

Em comparação com a placa 1, observam-se para a placa 10, valores menores da métrica do dano, o que leva a concluir que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm produz uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40mm. Para a placa 10, verificou-se que os valores das métricas com dano, computados para as três faixas de frequência foram distintos, sendo que na banda de frequência de 20KHz a 30KHz mostrou ter maior sensibilidade ao impacto (Figura 6), enquanto na faixa de 60KHz a 80KHz é menor a sensibilidade.

Quando ensaiados os corpos de prova 2 e 11 submetidos à energia de 8,78J, observou-se que não houveram falhas aparentes para as duas placas. Todavia, observa-se uma mudança nos picos dos eixos nos sinais de impedância, assim como nos valores da métrica, evidenciando que o método foi capaz de detectar os danos causados por impacto de energia 8,78J. Ao se analisar os resultados do diagrama de caixa da placa 2 para as três faixas de frequência verificaram-se que os valores das métricas com dano foram próximos entre si, sendo que a faixa de 60KHz a 80KHz (Figura 7) apresenta uma maior sensibilidade em relação aos danos provocados por impacto.

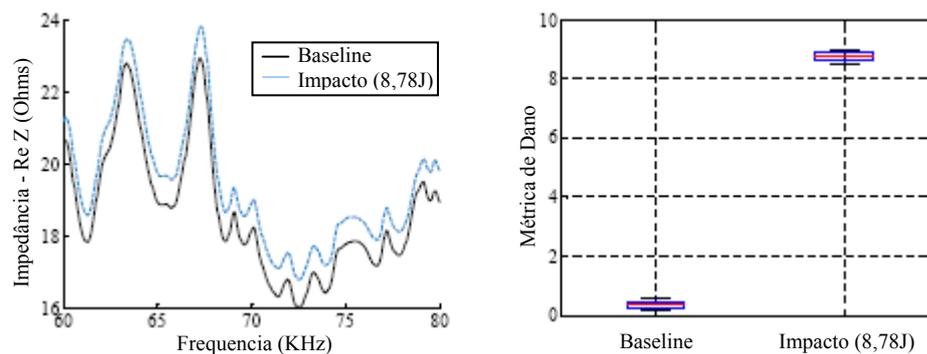


Figura 7: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 2, impactada com ponteira $\phi=12,54\text{mm}$ e energia $E=8,78\text{J}$ na banda de frequência de 60KHz a 80KHz.

Comparando-se os diagramas de caixa obtidos para as placas 2 e 11, notam-se valores maiores da métrica do dano para a placa 2, o que leva a concluir que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm impõe uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40mm.

As placas 3 e 12 foram impactadas as ponteiros de 12,5mm e 25,4mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 15J. Analisando os resultados obtidos, verificou-se o surgimento de trincas, sendo que na primeira foi perceptível uma maior severidade de dano. Nota-se que os sinais de impedância antes e após o impacto sofreram grandes variações, assim como os valores da métrica de dano. Com isso, pode-se dizer que o método foi capaz de detectar a presença de danos causados por impacto de energia 15J. Ao se analisar os resultados do diagrama de caixa obtidos para a placa 3, verificou-se que os valores das métricas foram similares para as duas primeiras faixas de frequência (20KHz a 30KHz e 35 a 45KHz), no entanto para a faixa de 60KHz a 80KHz (Figura 8) obteve-se um valor mais alto

da métrica, o que indica uma maior sensibilidade das funções de impedância adquiridas nesta última faixa.

Fazendo a mesma análise para a placa 12, verificou-se que os valores das métricas foram distintos, sendo que a faixa de 20KHz a 30KHz mostrou-se a menos sensível em relação ao dano e a faixa mais sensível foi a de 35KHz a 45KHz.

Comparando as placas 3 e 12, notam-se valores maiores da métrica do dano para a primeira, o que leva a concluir, mais uma vez, que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm leva a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40mm.

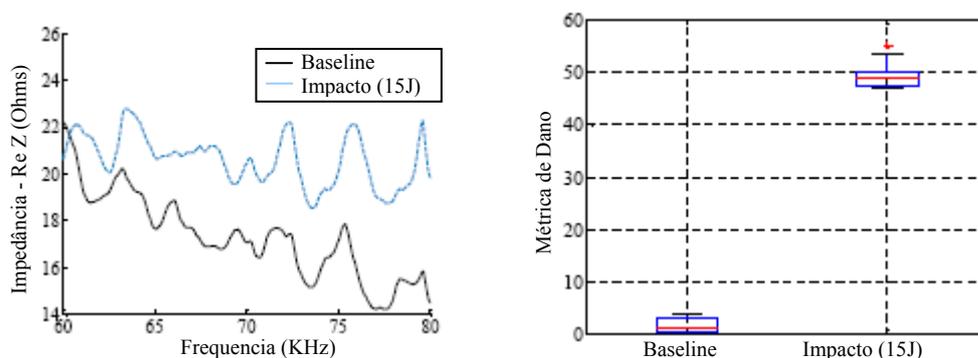


Figura 8: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 3, impactada com ponteira $\varphi=12,54\text{mm}$ e energia $E=15\text{J}$ na banda de frequência de 60KHz a 80KHz.

As placas 4 e 13 foram impactadas com as ponteiras de 12,5mm e 25,4mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 20J. Analisando os resultados obtidos, verificou-se na placa 4 o surgimento de trincas e delaminações; já na placa 13 verificaram-se pequenas trincas superficiais. Ambas as placas apresentaram um pequeno esmagamento na área impactada. Nota-se que os sinais de impedância antes e após o impacto sofreram grandes variações, assim como os valores da métrica de dano, o que segue a mesma tendência observada nos ensaios descritos anteriormente.

Ao se analisar os resultados do diagrama de caixa referentes à placa 4, verificou-se que os valores das métricas foram similares para as duas faixas de frequência (35 a 45kHz e 60 kHz a 80kHz), ao passo que, para a faixa 20kHz a 30kHz, obteve-se um valor menor de métrica.

Fazendo a mesma análise para a placa 13, verificou-se que os valores das métricas foram similares para as duas primeiras faixas de frequência (20KHz a 30KHz e 35KHz a

45KHz), enquanto, para a faixa 60KHz a 80KHz (Figura 9), obteve-se um valor menor de métrica.

A comparação dos resultados obtidos para as placas 4 e 13, leva a concluir, mais uma vez, que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm leva a uma condição mais severa de dado que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40mm. No entanto este fato não se confirma para as medições efetuadas na faixa de frequência de 60KHz a 80KHz.

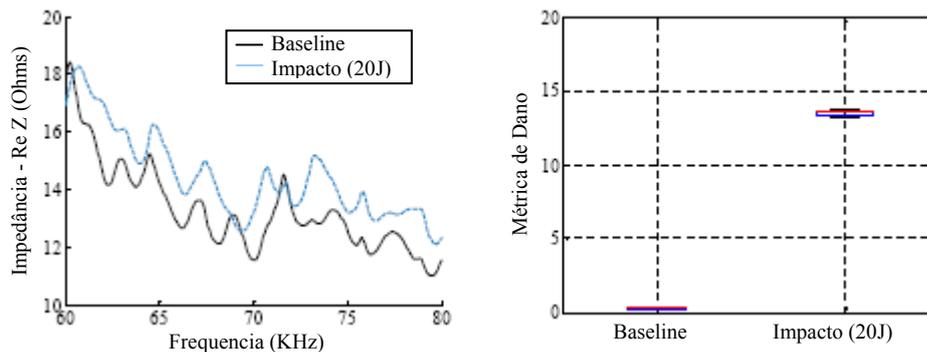


Figura 9: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 13, impactada com ponteira $\phi=25,40\text{mm}$ e energia $E=20\text{J}$ na banda de frequência de 60KHz a 80KHz

O procedimento foi repetido para as placas 5 e 14, que foram impactadas com ponteiros de 12,5mm e 25,4mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 69,68J. A partir dos resultados obtidos, verificaram-se danos visíveis tanto na face impactada quando na face posterior. Foram provocados furos no ponto de impacto das placas 5 e 14, com diâmetros de aproximadamente 15mm e 22mm, respectivamente. Nas faces posteriores das placas são visíveis as delaminações, rupturas de fibras e trincas.

Nota-se que os sinais de impedância antes e após o impacto sofreram grandes variações, o mesmo ocorrendo com os valores da métrica. Ao se analisar os diagramas de caixa da placa 5, verificou-se que os valores das métricas foram distintos para as três faixas de frequência, sendo que a faixa de 20KHz a 30KHz mostrou-se a menos sensível aos danos provocados por impacto e a faixa de frequência de 60KHz a 80KHz (Figura 10) mostrou-se a mais sensível.

Fazendo a mesma análise para a placa 14, verificou-se que os valores das métricas foram distintos para as três faixas de frequência, sendo que a faixa de 35KHz a 45KHz foi menos sensível aos danos provocados por impacto e a faixa de frequência de 60KHz a 80KHz mostrou-se a mais sensível. Fazendo uma comparação dos resultados obtidos para a placas 5 e

14, notam-se valores menores da métrica do dano para a primeira, o que pode ser explicado pelo fato de que a área do dano provocado pela ponteira 12,54mm é bem menor que a área do dano causado pela com a ponteira de 25,40mm.

A placa 14 foi também utilizada para averiguar a influência do posicionamento das pastilhas piezelétricas coladas na face impactada (PZT 3) ou na face posterior (PZT 1). Comparando os valores das métricas de dano apresentados na Tabela 3, adquiridas através das duas pastilhas em todas as faixas de frequência, nota-se que o PZT 3 mostra-se mais sensível ao dano, apresentando valores mais altos da métrica do dano.

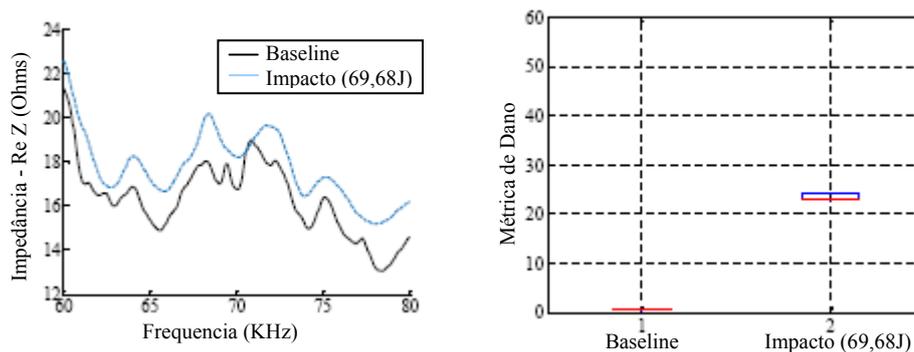


Figura 10: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 5, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e energia $E=69,68J$ na banda de frequência de 60KHz a 80KHz.

Tabela 3: Valores das métricas da Placa 14 (PZT 1 e PZT 3)

| Faixa de Frequencia | Placa 14 - PZT 1 (25.4mm) | | | Placa 14 - PZT 3 (25.4mm) | | |
|-----------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| | 20-30KHz | 35-45KHz | 60-80KHz | 20-30KHz | 35-45KHz | 60-80KHz |
| MD (Baseline) | 0,5239 | 0,8733 | 0,6411 | 0,5577 | 0,6043 | 0,308 |
| MD (Impacto (69.68J)) | 18,5598 | 15,2814 | 52,8876 | 21,315 | 18,5592 | 71,1425 |

Impactos Múltiplos

Ensaíram-se placas com impactos múltiplos, impactando-as três vezes no mesmo ponto com mesmo valor de energia. Adquiriram-se os sinais da impedância antes e após cada impacto nas três faixas de frequência: 20 a 30KHz, 35 a 45KHz e 60 a 80KHz, e a partir das funções de impedância medidas, foram avaliadas as métricas de dano. As energias utilizadas foram de 4,61J, 8,78J, 15,0J e 20,0J, com dois diâmetros de ponteiras 12,5mm e 25,4mm.

Deve-se ressaltar que impactos múltiplos com estas características são raramente encontrados em situações práticas.

As placas 6 e 15 foram impactadas três vezes com energia de 4,68J e ponteiros de 12,54mm e 25,40mm de diâmetro, respectivamente. Analisando os resultados, pode-se perceber, tanto para a placa 6 como para a placa 15, que os valores da métrica de dano aumentam continuamente com o número de impactos, coerente com a idéia da intensidade do dano aumentar no mesmo sentido.

Comparando os valores da métrica obtidos para as placas 6 e 15, notam-se valores maiores para a primeira, o que leva a concluir que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm.

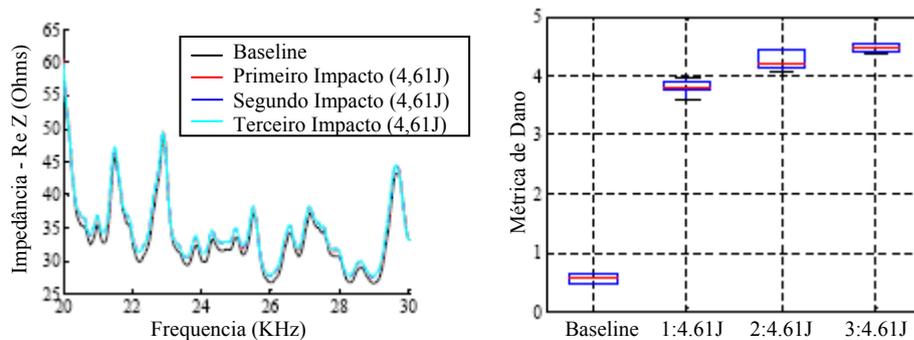


Figura 11: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 6, na faixa de frequência de 20KHz a 30KHz.

As placas 7 e 16 foram impactadas três vezes com as ponteiros de 12,54mm e 25,40mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 8,78J. Pode-se perceber, para a placa 7, um contínuo decréscimo dos valores da métrica de dano, para impactos sucessivos (Figura 12), ao passo que, para a placa 16, os valores permanecem praticamente constantes. Este comportamento contraria a tendência esperada de aumento contínuo da métrica de dano com o número de impactos.

Comparando os valores da métrica obtidos para as placas 7 e 16, nota-se valores maiores para a primeira, o que confirma a tendência de que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40mm.

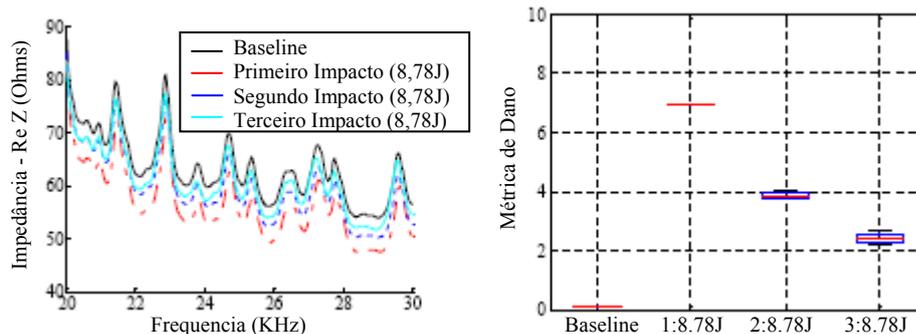


Figura 12: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 7, na faixa de frequência de 20KHz a 30KHz.

As placas 8 e 17 foram impactadas de forma similar à empregada nos ensaios precedentes, com energia de 8,78 J. Para a placa 8, os valores da métrica de dano permanecem praticamente constantes enquanto, para a placa 17, nota-se um contínuo aumento dos valores com o número de impactos.

Comparando os valores da métrica obtidos para as placas 8 e 17, notam-se valores menores para a primeira, o que contradiz a tendência observada anteriormente de que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm (placa 8) produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm (placa 17).

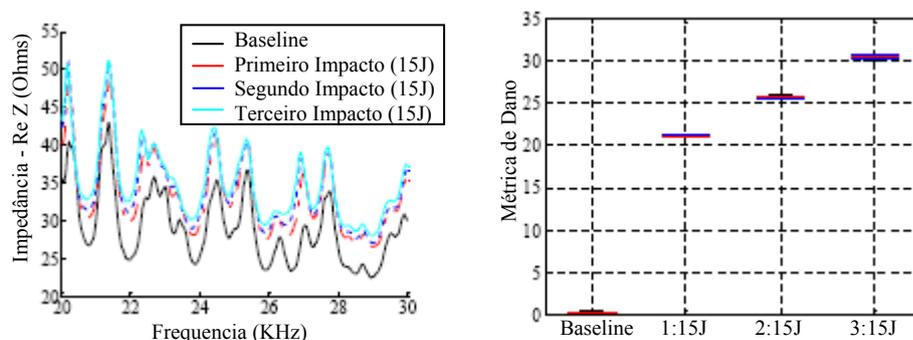


Figura 13: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 17, na faixa de frequência de 20KHz a 30KHz.

As placas 9 e 18 foram impactadas de forma similar à empregada nos ensaios precedentes, com energia de 20,0 J. Para a placa 9 nota-se um contínuo ligeiro aumento dos valores com o número de impactos. Por outro lado, para a placa 18, os valores da métrica de dano apresentam ligeiro decréscimo com o número de impactos.

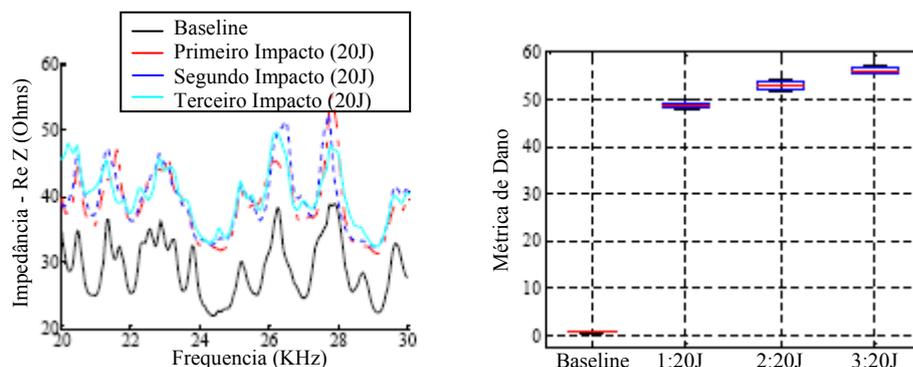


Figura 14: Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 9, na faixa de frequência de 20KHz a 30KHz.

Comparando os valores da métrica obtidos para as placas 9 e 18, notam-se valores maiores para a primeira, o que confirma a tendência de que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54mm produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40mm.

DISCUSSÃO

Análise Estatística da Métrica do Dano

Nesta seção aplicam-se técnicas de metamodelagem estatística como uma ferramenta de auxílio ao reconhecimento de padrões seguidos pela métrica do dano em função de alguns parâmetros considerados relevantes: a energia de impacto no caso de impactos simples e a energia e número e de impactos, no caso de impactos múltiplos.

Impactos simples

A Tabela 4 apresenta os valores da métrica do dano em todas as faixas de frequência e energia para os dois tipos de ponteiras. Nota-se a tendência predominante, embora não exclusiva, de aumento dos valores da métrica do dano com o aumento do valor da energia de impacto. Com base nestes dados, buscou-se ajustar um modelo que correlacionasse a métrica do dano com a energia de impacto. Escolheu-se a faixa de frequências de 20 a 30 KHz e a ponteira de formato esférico de 25,4 mm para análise, cujos valores correspondentes da métrica de dano são destacados.

Tabela 4: Valores da métrica do dano de acordo com a faixa de frequência e energia utilizadas.

| Energia (J) | Diâmetro da Ponteira: 12.5mm | | | Diâmetro da Ponteira: 25.4mm | | |
|-------------|------------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | 20-30KHz | 35-45KHz | 60-80KHz | 20-30KHz | 35-45KHz | 60-80KHz |
| 4,61 | 0,8572 | 0,8752 | 0,8359 | 0,7083 | 0,3688 | 0,1175 |
| 8,78 | 4,4262 | 5,9856 | 8,7617 | 3,0762 | 2,1476 | 3,0376 |
| 15 | 13,4339 | 13,5700 | 49,5813 | 6,0172 | 11,2813 | 8,7919 |
| 20 | 10,9920 | 14,6972 | 16,3987 | 15,8183 | 10,1143 | 14,3168 |
| 69,68 | 8,6738 | 11,2782 | 22,9155 | 18,5598 | 15,2814 | 52,8876 |

Primeiramente utilizando o programa de análise estatística MINITAB, foi obtido um modelo de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. A análise dos resíduos revelou qualidade insuficiente do modelo.

Para melhorar o modelo, em seguida, buscou-se aplicar um modelo cúbico (Fig. 15), resultando em valores da variação explicada e explicável de 99,8%, além de $F = MQR/MQr = 8291$ é maior que $F(95\%, 1,58) = 2,7694$, mostrando que este modelo ajustou-se bem aos pontos disponíveis. Ao se fazer a análise de variância verificou-se que os resíduos podem ser representados por uma distribuição normal (Fig. 16). Com isso, pode-se concluir que o metamodelo cúbico tem boa representatividade do experimento, ou seja, pode ser usado para determinar o valor da energia de impacto a partir da métrica de dano calculada a partir da função de impedância medida experimentalmente.

Análise de variância para o modelo Polinomial Cúbico (MINITAB):

Polynomial Regression Analysis: Energia versus MD

The regression equation is

$$\text{Energia} = 0,8103 + 3,757 \text{ MD} - 0,3615 \text{ MD}^2 + 0,01933 \text{ MD}^3$$

S = 1,14270 R-Sq = 99,8% R-Sq(adj) = 99,8%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|------------|----|---------|---------|---------|------|
| Regression | 3 | 32479,1 | 10826,4 | 8291,20 | 0,00 |
| Error | 56 | 73,1 | 1,3 | | |
| Total | 59 | 32552,2 | | | |

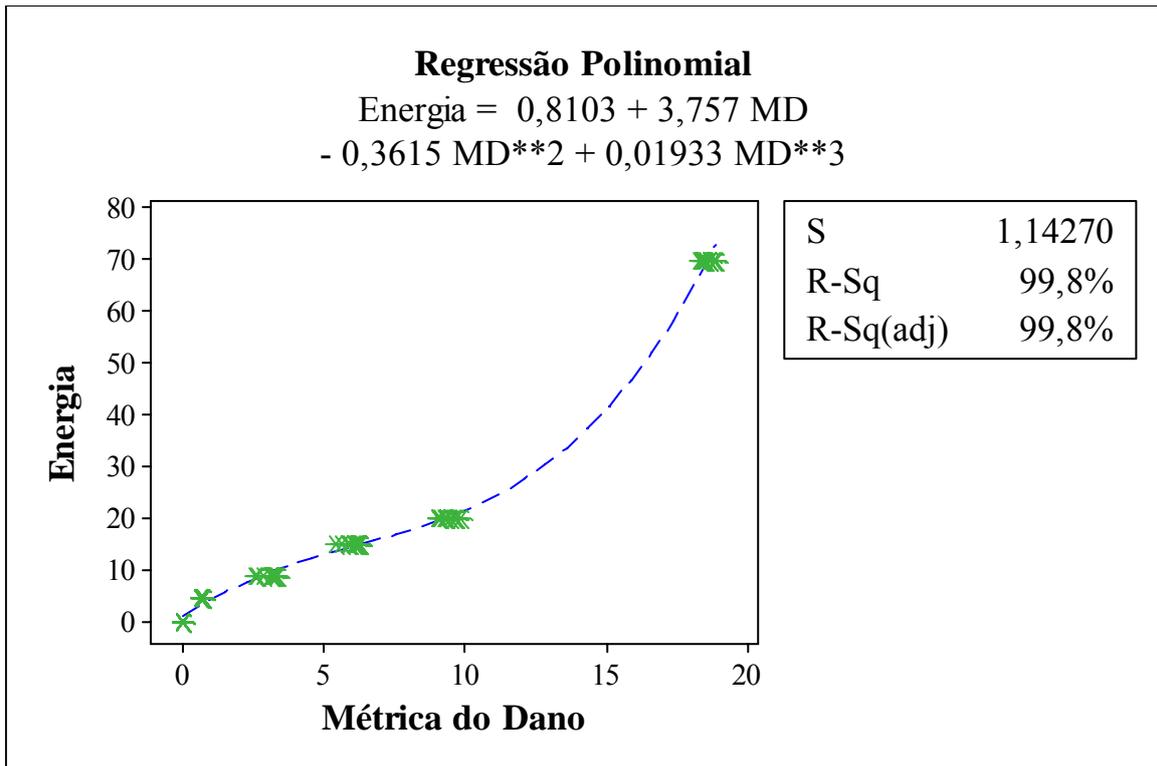


Figura 15: Gráfico da regressão polinomial (métrica do dano x energia) na faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz.

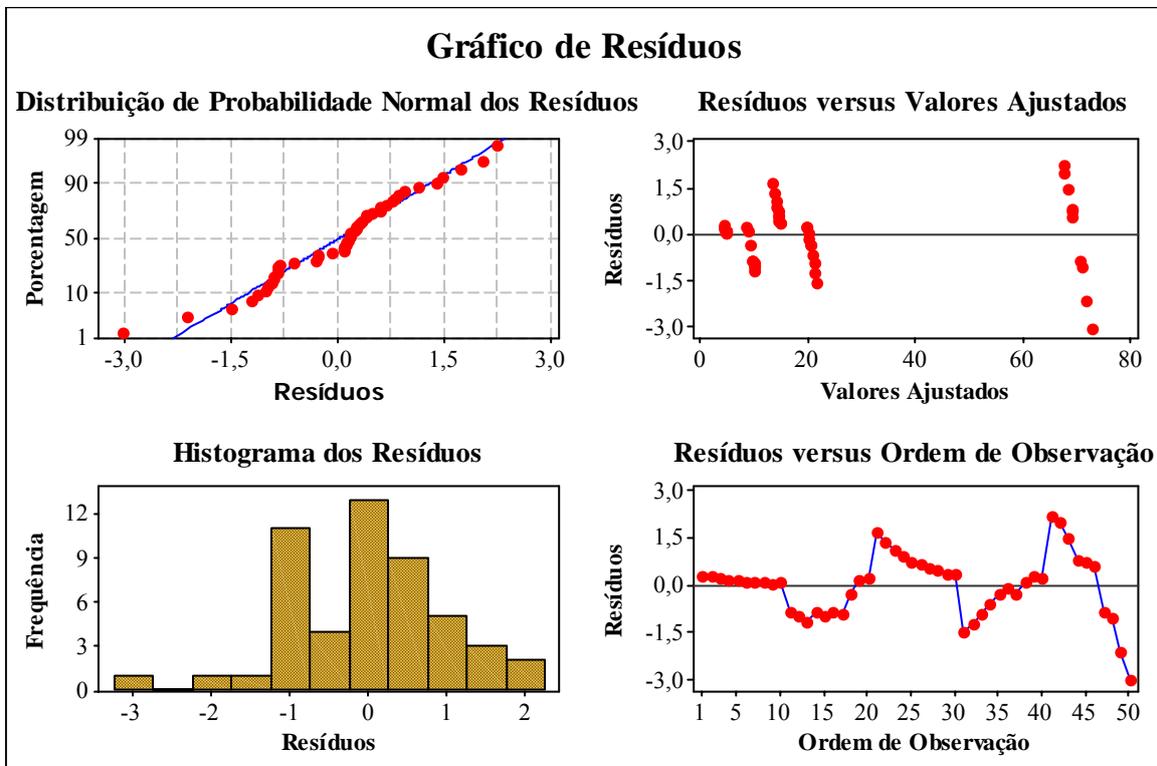


Figura 16: Gráficos de Resíduos para regressão polinomial na faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz..

Impactos múltiplos

O procedimento detalhado na seção anterior foi aplicado aos ensaios de impactos múltiplos, para os quais os valores da métrica do dano em todas as faixas de frequência e energia para os dois tipos de ponteiros, são apresentados na Tabela 5. Nota-se, em alguns casos, uma variação monotônica com um aumento ou diminuição dos valores da métrica em função do número de impactos; em outros casos, o comportamento não apresenta tal regularidade, havendo mesmo situações em que o valor da métrica permaneceu praticamente constante. Explicações para este comportamento demandam investigações complementares.

Foi ajustado um modelo polinomial visando correlacionar a métrica do dano com a ordem do impacto (1, 2, ou 3). Escolheu-se para análise a faixa de frequências de 20 a 30 KHz, ponteira de 12,5 mm de diâmetro e energia de impacto de 4,61 J, correspondendo aos valores da métrica de dano destacados.

Foi implementado um modelo cúbico Fig.17, resultando dos valores da variação explicada e explicável próximas de 95%, e na análise de variância os valores de $F = \text{MQR}/\text{MQr} = 137,55$ é maior que $F(95\%,3, 20) = 3,0984$, o que demonstra um ajuste satisfatório deste modelo aos pontos. Ao se fazer a análise de variância verificou-se que os resíduos obedecem satisfatoriamente uma distribuição normal (Fig. 18). Com isso, pode-se concluir que o metamodelo cúbico representa adequadamente o experimento. E a partir da equação de metamodelo é possível determinar através das métricas do dano, quantos impactos ocorreram na placa.

Tabela 5: Valores da métrica do dano após os impactos de acordo com a faixa de frequência e energia utilizadas.

| | | Métrica do Dano | | | | | | | | |
|------------|---------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 20-30KHz | | | 35-45KHz | | | 60-80KHz | | |
| Φ Ponteira | Energia | 1ºImpacto | 2ºImpacto | 3ºImpacto | 1ºImpacto | 2ºImpacto | 3ºImpacto | 1ºImpacto | 2ºImpacto | 3ºImpacto |
| 12.5mm | 4,61 J | 3,84640 | 4,20560 | 4,46217 | 2,96833 | 3,47867 | 4,04000 | 2,29700 | 2,75317 | 4,06533 |
| | 8,78 J | 6,77600 | 1,52317 | 0,98217 | 8,68033 | 4,92033 | 2,04600 | 8,67250 | 4,57850 | 6,29250 |
| | 15 J | 10,64783 | 10,38533 | 11,07567 | 13,39100 | 11,96767 | 11,58733 | 29,24983 | 21,51533 | 20,89117 |
| | 20 J | 48,87383 | 52,99417 | 56,29133 | 46,49683 | 46,25183 | 47,45933 | 137,40117 | 151,79783 | 151,94017 |
| 25.4mm | 4,61 J | 2,57417 | 3,23817 | 3,20733 | 1,67217 | 2,32933 | 2,18167 | 2,12817 | 2,09867 | 2,33700 |
| | 8,78 J | 6,10533 | 5,98867 | 5,75417 | 6,62600 | 6,41233 | 6,40200 | 4,88583 | 4,84267 | 4,92150 |
| | 15 J | 21,19667 | 25,75067 | 30,47333 | 30,69150 | 35,58867 | 39,82800 | 48,88867 | 56,73850 | 61,21383 |
| | 20 J | 28,57500 | 27,61200 | 26,14417 | 24,76383 | 22,74133 | 20,57550 | 19,49233 | 17,02667 | 12,61933 |

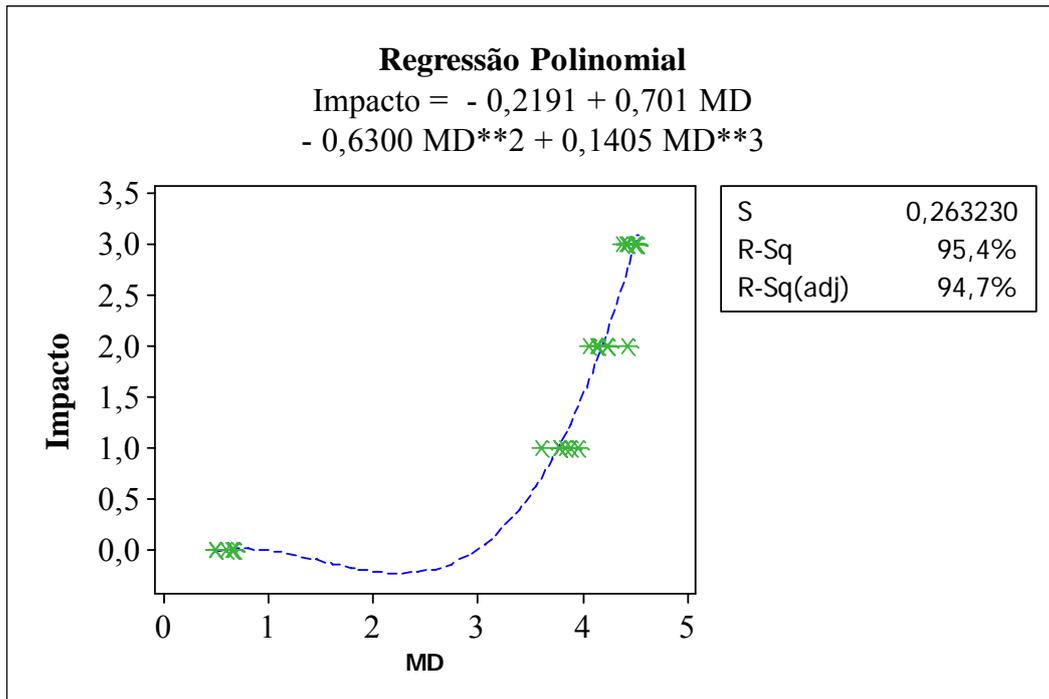


Figura 17: Gráfico da regressão polinomial (métrica do dano x Energia) na faixa de frequência de 20 KHz a 30KHz.

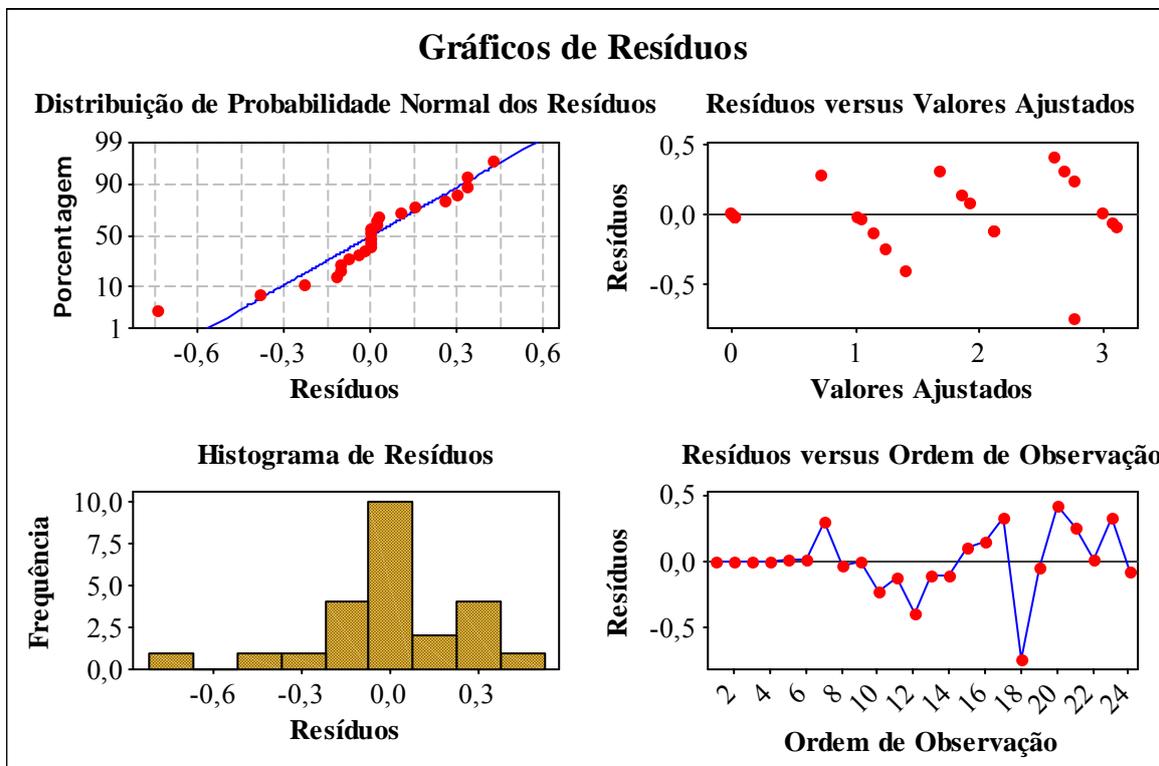


Figura 18: Gráficos de Resíduos para regressão polinomial na faixa de frequência de 20 KHz a 30KHz

Análise de variância para o modelo Polinomial Cúbico (MINITAB):

Polynomial Regression Analysis: Impacto versus MD

The regression equation is

$$\text{Impacto} = - 0,2191 + 0,701 \text{ MD} - 0,6300 \text{ MD}^2 + 0,1405 \text{ MD}^3$$

S = 0,263230 R-Sq = 95,4% R-Sq(adj) = 94,7%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|------------|----|---------|---------|--------|------|
| Regression | 3 | 28,6142 | 9,53807 | 137,65 | 0,00 |
| Error | 20 | 1,3858 | 0,06929 | | |
| Total | 23 | 30,0000 | | | |

CONCLUSÃO

O método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica mostrou-se eficiente para a detecção de danos provocados por impactos de baixa energia em placas constituídas de materiais compostos, revelando-se ainda bem adaptado às necessidades apresentadas pela indústria aeronáutica, que serviram de motivação para a realização deste trabalho.

1ª. Em todos os ensaios realizados, foram obtidas variações da métrica de dano superiores às variações desta métrica associadas às incertezas de medições e variações ambientais, o que indica que a técnica de monitoramento, associada à métrica de dano escolhida, é capaz de detectar danos causados por impacto em todas as condições estudadas;

2ª. O principal interesse em examinar diferentes faixas de frequência é o de aumentar a sensibilidade da métrica do dano em relação às variações estruturais causadas pelo dano. A escolha das faixas empregadas foi feita por tentativa e erro, com base na experiência prévia do grupo de pesquisa. Os resultados mostram que as sensibilidades variam em função da condição específica de teste, não sendo possível identificar uma faixa que se mostrem mais eficientes que as demais em todas as condições testadas. Entretanto, em situações reais é possível aplicar o procedimento sucessivamente para várias faixas de frequência para uma escolha *a posteriori* das curvas de impedância a serem utilizadas, o que implica, evidentemente, em aumento dos custos e tempo de realização dos testes.

3ª. No tocante ao posicionamento dos transdutores piezelétricos na face impactada ou na face oposta à impactada, observa-se que, para ambas as condições, foi possível detectar danos causados pelo impacto, notando-se que o transdutor posicionado sobre a face impactada proporcionou maior sensibilidade das funções de impedância em todas as faixas de frequência consideradas. Todavia, em virtude do pequeno número de ensaios realizados para investigar esta influência, que se limitaram ao caso de impacto com dano extremamente severo (energia de 69,68 J), acredita-se que tal conclusão necessite ser confirmada por ensaios complementares.

4ª. Foram observadas, em todos os casos, diferenças entre os valores da métrica de dano obtidas para as duas dimensões consideradas da ponteira (12,54 mm e 25,40 mm), fato que confirma que as dimensões da ponteira exercem influência sobre a severidade do dano, esta influência podendo ser capturada pela técnica de monitoramento investigada. Na maioria dos corpos de prova impactados com energias de até 20 J, nota-se que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54 mm leva possivelmente a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm visto que os valores das métricas do dano após o impacto com ponteira de diâmetro de 25,40 mm tiveram valores menores do que aquelas impactadas com a ponteira de 12,54 mm. No entanto para as placas impactadas com energia de 69,68 J, nota-se tendência inversa, que pode ser explicada pela extensão da área do dano, visto que o dano provocado pela ponteira de 25,40 mm é maior do que 12,54 mm, assim como a distância do dano da mesma é mais próxima à pastilha piezelétrica.

5ª. Os resultados obtidos para os ensaios de impacto simples mostram a tendência preponderante, mas nem sempre observada, de aumento da métrica de dano com o aumento da energia de impacto, tendência que, uma vez confirmada, seria útil para avaliação da severidade do dano e da vida residual. Nenhuma tendência clara pode ser observada entre a métrica do dano e o número de impactos para ensaios de impactos múltiplos.

As duas últimas conclusões acima levam à questão fundamental acerca da relação entre a severidade do dano e a energia de impacto (ou número de impactos), a qual necessita de investigação aprofundada. Com efeito, ensaios complementares com técnicas de ensaios não destrutivos (ultra-som, raios-X) tornam-se necessários para melhor compreensão dos diferentes graus de severidade que, no caso de materiais compostos, envolve vários fatores, podendo estar ligados à extensão da zona danificada ou aos diferentes mecanismos de dano (ruptura de fibras, ruptura de matriz, delaminação).

6ª. Foi constatada a conveniência e utilidade das técnicas baseadas em metamodelos estatísticos para o estabelecimento de relações entre grandezas envolvidas nos ensaios de

impactos simples e múltiplos. Tais técnicas mostram-se interessantes especialmente em procedimentos de avaliação inversa das condições de impacto a partir de medições experimentais de funções de impedância eletromecânica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela bolsa implementada para que a realização deste trabalho fosse possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bartelds, G. “Aircraft structural health monitoring, prospects for smart solutions from a european viewpoint, structural health monitoring, current status and perspectives”. Stanford University, Palo Alto, California, p. 293–300, 1997.

Cawley, P., 1984, “The Impedance Method of Non-Destructive Inspection”, NDT International, Vol. 17, Nº 2, USA, pp. 59-65.

Davis, H., Mansfield, R. The Wi-Fi Experience: Everyone’s Guide to 802.11B Wireless Networking. USA. Que Press, 2002.

Farrar, C., and Damage Prognosis Team from Weapon Response Group, Los Alamos National Laboratory, 2003, “An Introduction to Damage Prognosis”, Pan American Advanced Study Institute on Damage Prognosis, Florianopolis, SC, Brasil.

Giurgiutiu, V., “Actuators and Smart Structures”, Encyclopedia of Vibrations Academic Press, 2000.

Grondel, S., Assaad, J., Delebarre, C., Moulin, E., “Health Monitoring of a Composite Wingbox Structure”, Ultrasonics 42, 2004, pp 819-824.

- Kabeya, K. "Structural Health Monitoring Using Multiple Piezoelectric Sensors and Actuators. Master Thesis". Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg, USA, 1998.
- Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A., 1994, "Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, 12–20.
- Melchers, R. E. "Structural Reliability, Analysis and Prediction". J. Wiley & Sons, New York, 1999 (2nd ed.), 437 p., ISBN 0471983241.
- Mendonça, P.T.R. "Materiais Compostos e Estruturas Sanduíche: Projeto e Análise", Editora Manole, 1 ed., Barueri 2005. 632p.
- Moulin, E., Assaad, J. Delebarre, C., Kaczmarek, H., Balageas, D. "Piezoelectric transducer embedded in a composite plate: application to lamb wave generation". *Journal of Applied Physics*, vol. 82(5), p. 2049-2055, 1997.
- Raju, V. "Implementing impedance-based health monitoring". Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg, USA, 1997.
- Su, Z., Ye, L., Lu, Y., "Guided Lamb Waves for Identification of Damage in Composite Structures: A Review", *Journal of Sound and Vibration* N° 295, March 2006, pp. 753-780.
- Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A., 1995, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, 134–139.
- Tsuruta, K. M., 2008, *Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica da Impedância Eletromecânica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.