

KARINA MAYUMI TSURUTA

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE MATERIAIS COMPOSTOS
SUJEITOS A IMPACTOS EMPREGANDO A TÉCNICA
DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

KARINA MAYUMI TSURUTA

.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. Domingos Alves Rade

UBERLÂNDIA – MG

2008

*Dedico este trabalho a Marika (Battian –
in memmorian) e Takeshi (Dittian).*

"É praticamente uma lei na vida. Quando uma porta se fecha para nós, outra se abre. A dificuldade está em que, freqüentemente, ficamos olhando com tanto pesar a porta fechada, que não vemos aquela que se abriu." Andrew Carnegie

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sempre ter me dado fé e força para realização deste trabalho.

Ao meu orientador e professor, Domingos, pela paciência com minha teimosia, por sempre ter acreditado em meu trabalho e capacidade, pela ajuda financeira para que este trabalho se tornasse real, além de ter me auxiliado no meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amados pais, irmãs (Sú e Paty) e familiares por terem me fornecido todo o suporte, tanto financeiro como emocional para continuar lutando pelos meus objetivos.

Ao meu noivo, João Marcelo, pelo amor e paciência, por ter compreendido a minha ausência, ter acreditado em meu potencial, além de me apoiar em todas as horas difíceis.

A um grande amigo em especial, o Zé, que sempre me ajudou na resolução dos meus problemas complexos, me apoiando e incentivando. Obrigada pela amizade e por ter me aturado desde a graduação.

E claro que não poderia esquecer de agradecer meus companheiros do LMest, em especial: Albert, Felipe e Lizeth.

Aos membros do MFLab (Fabrício, Felipe, Gustavo, Sigeo e Thiago), Ana Paula e Pri pela amizade e solidariedade.

Aos amigos que fiz ao longo desta trajetória, o Leandro, David, Heléa e Carolzinha, por terem tido paciência pelo meu mau humor e estresse, além de me ajudarem eficientemente nos meus projetos.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio, principalmente aos professores Valder e Raquel, e técnicos Ângela, Carlão e Chico.

Aos meus querido amigos caninos, Tilim, Meguie, Miuki e Maliskinha, por sempre serem tão gentis, carinhosos e companheiros.

À Embraer pela doação da placa de material composto e pelo interesse na realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, fundamental para a realização deste trabalho.

TSURUTA, K. M. **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica da Impedância Eletromecânica**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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, granizo, pedras na pista de pouso/decolagem e por ferramentas durante a manutenção. Em vista disto, é grande o interesse em detectar danos incipientes provocados por impactos em componentes estruturais constituídos de materiais compostos. 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. A metodologia adotada consiste em realizar impactos em corpos de prova de materiais compostos empregando um dispositivo pendular *ad hoc* que permite obter diversos valores da energia de impacto. Para cada corpo de prova, a impedância eletromecânica é medida antes e após os testes de impacto, sendo definida uma métrica de dano que estabelece a diferença entre as funções de impedância nas duas condições. 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 à condição de impactos simples ou 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 e de distinguir, em significativa parte dos casos, os diferentes graus de severidade do dano produzido nas diversas condições de teste. 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. Tais técnicas mostraram-se úteis, especialmente em procedimentos de avaliação inversa das condições de impacto a partir de medições experimentais de funções de impedância eletromecânica.

Palavras chave: Monitoramento da integridade estrutural, Impedância eletromecânica, Metamodelagem., Impacto de baixa energia, Materiais compostos.

TSURUTA, K., M. **Structural Health Monitoring of Composite Materials Subjected to Impacts Using the Electromechanical Impedance Technique**. 2008. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Nowadays, composite materials have increasingly replaced traditional materials in applications that require improved performance, safety, economy and durability. Nonetheless, such materials exhibit complex damage mechanisms that cannot be easily detected in early stages. Failures can occur during manufacturing, operation or even in the course of maintenance. In aeronautical structures, a major cause of damage is the collision with foreign objects, such as birds, ice, stones of working tools used for maintenance interventions. Hence, it becomes very interesting to detect incipient damage provoked by impact in composite structural components. In this context, the aim of this Dissertation is to evaluate the use of a structural health monitoring technique based on the concept of electromechanical impedance for detection and evaluation of the severity of low-energy impact damage induced in composite plates. The electromechanical impedance method is a non-destructive technique which explores the electromechanical coupling of piezoelectric materials bonded to the surface of the monitored structure. The methodology adopted consists in performing impacts in composite specimens using an *ad hoc* pendulum-type device conceived in such a way that different values of impact energy can be achieved. For each specimen, the electromechanical impedance functions are measured before and after the impact tests, and such functions are used to compute a damage metric which establishes the difference between the impedance functions in the two conditions. 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. Also, it was investigated the influence of the frequency band in which the impedance functions are acquired and the influence of the position of the piezoelectric transducers, either on the impacted surface or on the surface opposite to the impacted one. The results of the experiments show that the electromechanical impedance technique is efficient in detecting the presence of damage caused by impacts and can distinguish, in a significant part of the cases, between different damage severity levels induced by different impact 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. Such techniques have proved to be useful, especially for the inverse evaluation of the impact conditions from measured values of electromechanical impedance.

Keywords: Structural health monitoring, Impedance-based monitoring, Metamodeling, Low-energy impact. Composite materials.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos introdutórios

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.* (2005), *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 primordiais, sobretudo quando a existência de danos implicar a 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 são 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.* (2005), entende-se por Monitoramento de Integridade Estrutural como o processo de detecção de danos que envolve 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.* (2005) definem ainda o Monitoramento de Uso (*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 a 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.* (2004), 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 a redução da 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.* (2004), 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)

Conforme será visto no Capítulo 3, 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 a MHz, 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 piezoelétricos, a técnica baseada na impedância eletromecânica vem sendo amplamente estudada, sendo considerada uma das mais promissoras (SU *et al.*, 2006). Está técnica baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de um transdutor piezoelétrico 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, 2002; KABEYA, 1998; KIM, 2002; 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 envolvem 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.* (2004) 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 inclui-se a técnica baseada na impedância eletromecânica, que constitui o objeto desta Dissertação.

1.2 Objetivos e metodologia do 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 reportado nesta Dissertação 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 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 (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. Constitui uma extensão da experiência prévia do grupo de pesquisa do LMEst acerca da técnica da impedância eletromecânica, mediante sua aplicação a materiais compostos.

1.3 Organização da Dissertação

O presente memorial de Dissertação de Mestrado é estruturado em seis capítulos, com os seguintes conteúdos:

Este primeiro capítulo introdutório, no qual é feita a caracterização e contextualização do tema estudado, sendo apresentados os objetivos e um delineamento da metodologia empregada.

No segundo capítulo é apresentada uma síntese sobre as principais características, formas atuais de utilização e mecanismos de falhas de materiais compostos.

O Capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica sobre alguns dos principais métodos de monitoramento de integridade estrutural, enfatizando-se os conceitos fundamentais relacionados com a técnica da impedância eletromecânica.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação da metodologia experimental utilizada na dissertação.

O Capítulo 5 trata da aplicação da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica e do processamento dos sinais de impedância visando observar correlações entre a métrica definida e os danos causados por impactos simples e múltiplos.

O Capítulo 6 comporta um estudo complementar sobre o uso de metamodelagem baseada em redes neurais artificiais, visando estabelecer correlação entre a métrica de dano e as condições de impacto.

Por fim, o sétimo capítulo traz as conclusões gerais resultantes do trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

Materiais Compostos

Serão abordados neste capítulo alguns dos aspectos considerados mais relevantes sobre os materiais compostos, tais como tipos e características, mecanismos de dano que ocorrem neste tipo de material, descrição de algumas das aplicações desses materiais em vários ramos da indústria e exposição da terminologia adotada nesta dissertação para a designação dos estratificados laminados. Aspectos referentes ao processo de fabricação e às características individuais dos diferentes tipos de matrizes e fibras não serão abordados por se tratar de assuntos específicos e demasiadamente amplos, podendo ser encontrados em várias referências bibliográficas (BERTHELOT, 1992); CALLISTER Jr., 2002; GAY *et al.*, 2002; MENDONÇA, 2005).

2.1 Introdução

Os materiais compostos resultam da combinação macroscópica de dois ou mais componentes distintos, com o intuito de enfatizar certas características desejáveis destes componentes, as quais não são apresentadas quando cada um deles é considerado isoladamente.

Os materiais compostos são utilizados desde a antiguidade, embora seu desenvolvimento no âmbito industrial seja considerado um evento recente, do Século XX

(MENDONÇA, 2005). Um dos exemplos encontrados na antiguidade diz respeito à otimização do desempenho de algumas armas convencionais, como nas espadas japonesas. Estas tinham suas lâminas manufaturadas a partir de aço e ferro doce, a parte de aço era estratificada e colada em forma de placas, sendo que os defeitos e impurezas eram orientados em uma mesma direção, o que confere boa flexibilidade e resistência ao impacto (GAY *et al.*, 2002).

No contexto da engenharia estrutural, os materiais compostos permitem um melhor desempenho de certas estruturas devido à sua baixa relação peso/resistência.

A transparência dos compostos a ondas eletromagnéticas pode igualmente justificar seu emprego em certas aplicações como mesa de scanner, guias de ondas, etc.

Os materiais compostos também resistem satisfatoriamente ao fogo e a elevadas temperaturas, além de proporcionar baixas emissões tóxicas, pouca opacidade das fumaças e baixa inflamabilidade. Certos compostos à base de resina termoplástica resistem aos choques e permitem o retorno das peças a suas formas originais após um impacto de velocidade moderada. Eles também podem absorver uma parte de energia do impacto e assim reduzir as conseqüências do choque sobre a estrutura global ou sobre seus componentes.

Os compostos ainda podem funcionar como isolantes acústicos e/ou térmicos. Devido a sua grande rigidez e capacidade de absorção de energia, os compostos de fibras de carbono podem ser empregados em estruturas localizadas em áreas sujeitas a eventos sísmicos. A resistência destes materiais a solicitações mecânicas e à corrosão permite aumentar a vida útil da estrutura bem como a sua confiabilidade. Por sua vez, os materiais compostos termo-rígidos, como possuem baixa resistência ao choque, devem ser utilizados com maior cautela, pois ficam mais susceptíveis a fissuras e delaminações.

Apesar de todas as vantagens enumeradas acima, a utilização de materiais compostos em alta escala é limitada pelas dificuldades encontradas na sua concepção, por influências ambientais e pela relativa complexidade de modelos que descrevam satisfatoriamente o comportamento global, se comparados aos materiais metálicos tradicionais. Para caracterizar os materiais compostos de maneira eficaz, códigos de cálculo específicos, bem como experimentos detalhados, devem ser desenvolvidos, o que constitui atualmente uma vasta área de pesquisa.

2.2 Arquitetura dos Materiais Compostos

A concepção de um material composto necessita da associação de dois ou mais componentes, reforço e matriz, que devem ser compatíveis entre si e se consolidarem mecanicamente. As propriedades resultantes são determinadas pelas propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER Jr, 2002).

Os compostos são classificados segundo o tipo de material de reforço: compostos reforçados com fibras, compostos particulados, compostos sanduíche, conforme esquema apresentado na Fig. 2.1. Estes três tipos são descritos brevemente nas seções a seguir.

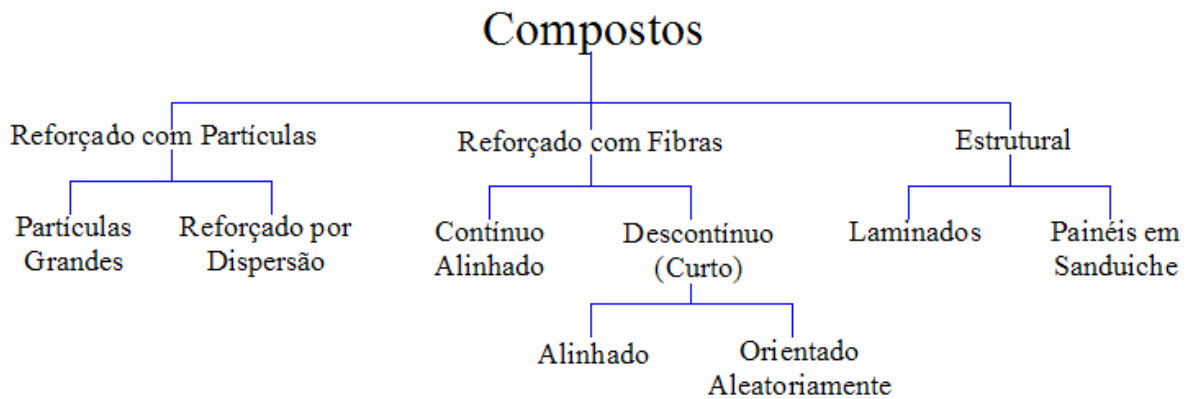


Figura 2.1 - Esquema de classificação dos materiais compostos (adaptado de (CALLISTER Jr, 2002)).

2.2.1 Compostos Reforçados com Fibras

As fibras consistem de filamentos contínuos que podem ser longos, ou curtos, com comprimentos na faixa de 5 mm a 25 mm (MENDONÇA, 2005; GAY *et al.*, 2002). Utilizam-se geralmente fibras de alto desempenho, tais como fibras de vidro, carbono ou Kevlar®.

Quanto à disposição, as fibras podem ser paralelas, unidirecionais como na Fig. 2.2 (a), ou bidirecionais, em forma de tecido com na Fig. 2.2 (b), ou ainda podem ser orientadas aleatoriamente, contínuas ou picotadas (MENDONÇA, 2005).

Lâminas reforçadas por fibras possuem boas propriedades mecânicas apenas nas suas direções preferenciais. Dessa forma, geralmente as lâminas são combinadas em laminados,

como mostrado na Fig. 2.2 (c), de forma a melhorar as características em outras direções, de modo a satisfazer as necessidades impostas pelo carregamento determinado na etapa de projeto. Os laminados tanto podem ser planos, em forma de placas, ou curvos, formando cascas. Os compostos podem ainda ser conformados como corpos sólidos tridimensionais (MENDONÇA, 2005).

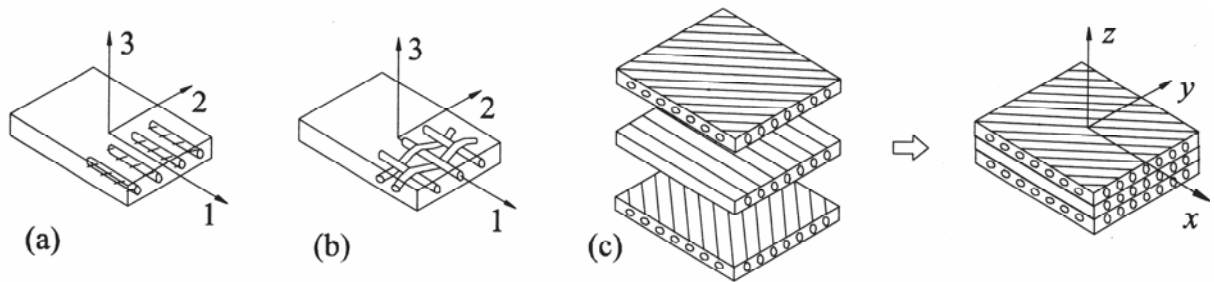


Figura 2.2 - (a) lâmina com fibras unidirecionais; (b) lâminas com fibras tecidas; (c) laminado composto por várias lâminas orientadas em diferentes direções (MENDONÇA, 2005).

Na grande maioria de peças estruturais (vigas, placas e cascas) a estrutura composta laminada (denominada estratificado) é constituída de sucessivas lâminas (camadas), idênticas ou não, dispostas com diferentes orientações ao longo da espessura, conforme ilustrado na Fig.2.3,

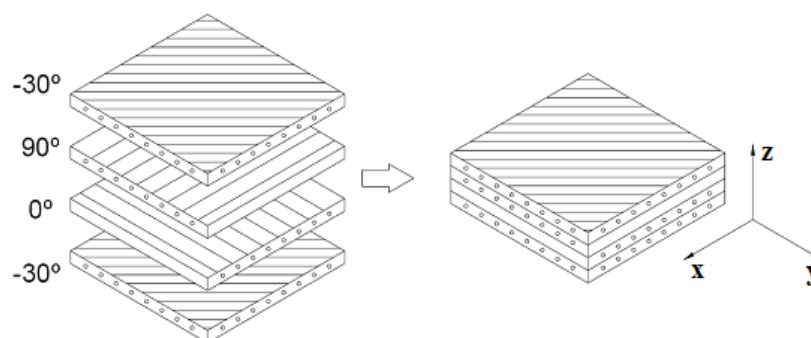


Figura 2.3 - Composto laminado formado por várias lâminas orientadas $[-30^\circ / 90^\circ / 0^\circ / -30^\circ]$ (MENDONÇA, 2005).

As fibras pertencentes a cada uma das lâminas orientadas localmente por um sistema designado por 1-2-3 (ou L-T-T') podem ser orientadas em relação ao sistema global de referência x - y - z adotado para o laminado como um todo, conforme ilustrado na Fig. 2.4.

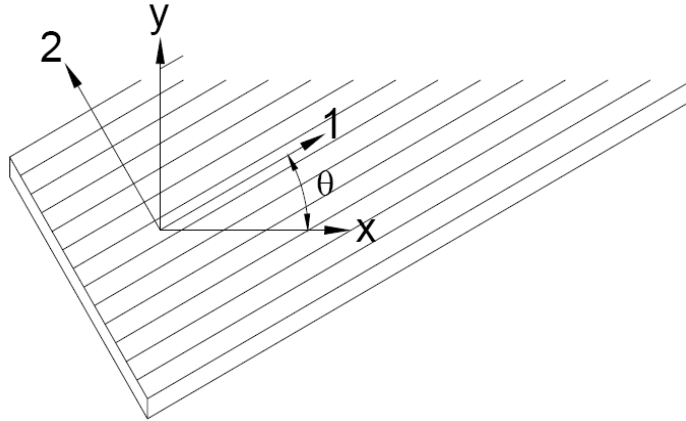


Figura 2.4 - Vista de uma lâmina com orientação arbitrária θ segundo o eixo de referência x - y (adaptado de (DA ROCHA, 1999)).

A designação dos laminados é efetuada segundo a disposição das camadas e a orientação de cada camada com relação aos eixos empregados, sendo adotada a seguinte convenção:

- * Os estratificados simétricos em relação ao plano médio de referência são designados pelo índice subscrito S, sendo necessária a designação apenas de metade das camadas sucessivas;
- * Cada camada é designada por um número indicando o valor em graus do ângulo que a direção das fibras faz com o eixo de referência x . Exemplo: $[\pm 45/30/90/90/30/45]_s$;
- * As camadas sucessivas são separadas por uma barra (/) se os ângulos forem diferentes; se forem iguais, são separadas por espaço;
- * As camadas sucessivas de mesma orientação são designadas por um índice numérico. Exemplo: $[\pm 45/30/90_2/30/\pm 45]_s$;
- * As camadas são nomeadas sucessivamente de uma face à outra. Colchetes ou parênteses indicam o início e o fim da notação;

- * Camadas orientadas com ângulos iguais em valor absoluto, mas opostas em sinal, são indicadas através do acréscimo dos sinais + e -;
- * A repetição de seqüência pode ser indicada por um índice subscrito que se refere ao número de vezes que uma seqüência é repetida. Exemplo: $[(\pm 45/30/90)_2]_s$. Neste exemplo a seqüência de camadas $\pm 45/30/90$ é repetida duas vezes;
- * Em estratificados híbridos, ou seja, constituídos de camadas sucessivas comportando fibras de diferentes naturezas, é necessário mencioná-las dentro da designação. Por exemplo, para um estratificado qualquer formado por resinas de vidro (v) e carbono(c) tem-se: $[0v/45c/30c]_s$.

No que diz respeito às suas características mecânicas, os materiais compostos podem ser classificados em isotrópicos, anisotrópicos e ortotrópicos. Um material isotrópico é aquele que possui as mesmas propriedades mecânicas em todas as direções. Já os materiais anisotrópicos são aqueles cujas propriedades mecânicas diferem em todas as direções. Um material ortotrópico apresenta uma “anisotropia parcial”, possuindo dois planos de simetria em termos de propriedades mecânicas, sendo estes dois planos perpendiculares entre si (GAY *et al.*, 2002).

Em geral, a caracterização de um dado material como ortotrópico, isotrópico ou anisotrópico é feita pela modelagem numérica, a partir das propriedades dos constituintes, ou pela realização de ensaios, aplicando-se cargas e medindo-se as deformações em várias direções. Na Fig. 2.5 (a) é ilustrada a diferença entre as deformações apresentadas por um material isotrópico e um material anisotrópico. Em algumas situações, entretanto, um simples exame visual é suficiente para caracterizar uma lâmina como sendo ortotrópica (MENDONÇA, 2005).

A Figura 2.5 (b) mostra os elementos principais de uma lâmina em uma malha de material ortotrópico. A direção das fibras define as três direções principais, que são tomadas como referência nas definições de propriedades mecânicas, tensões, deformações e demais cálculos básicos.

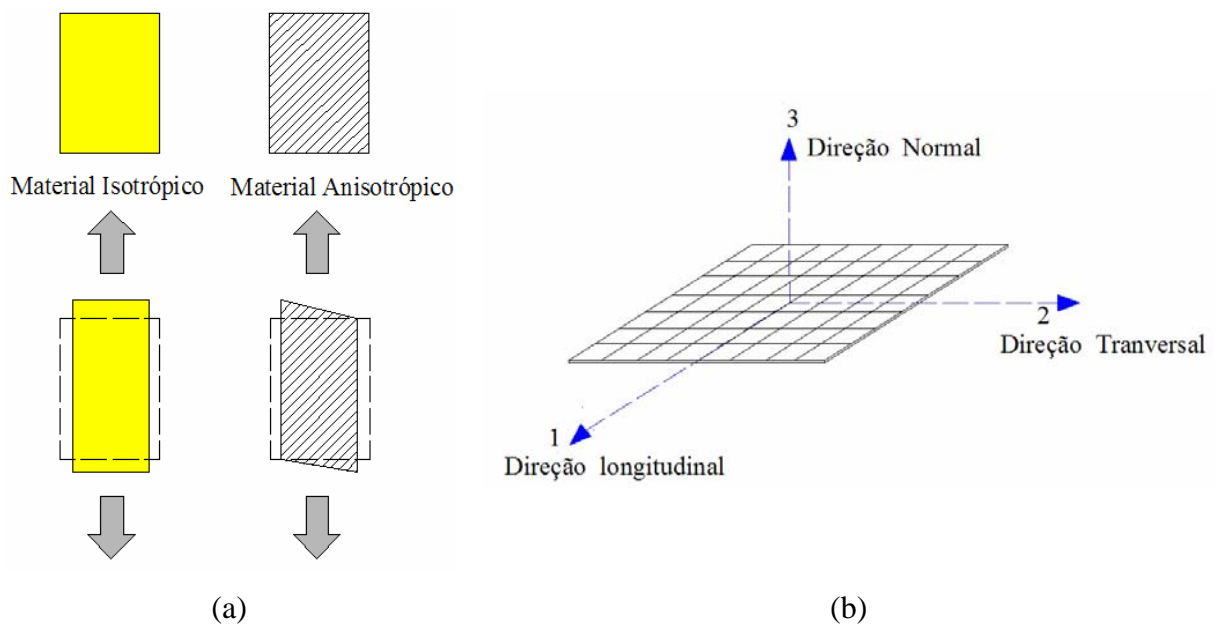


Figura 2.5 - (a) Comparação de deformação entre uma placa de material isotrópico e material anisotrópico (adaptado de GAY *et al.* (2002)); (b) direções principais das propriedades mecânicas em uma lâmina (material ortotrópico) (adaptado de (BERTHELOT (1992))

2.2.2 Compostos reforçados por partículas

De acordo com Mendonça (2005), normalmente as partículas não possuem uma dimensão predominante como no caso das fibras e geralmente a sua presença não é tão efetiva no incremento da resistência da matriz. A presença de partículas muito rígidas imersas em matriz frágil pode até mesmo reduzir a resistência do composto em virtude da concentração de tensões no material da matriz adjacente. Entretanto, o uso de partículas permite o incremento de outras propriedades, como:

- * Condutividade ou isolamento térmico ou elétrico;
- * Resistência a altas temperaturas;
- * Redução de atrito;
- * Resistência ao desgaste superficial;
- * Melhoria da usinabilidade;
- * Aumento da dureza superficial;
- * Redução de custos.

A Figura 2.6 ilustra alguns exemplos de compostos reforçados por partículas, sendo que na Fig.2.6 (a) é ilustrado um composto feito de partículas grandes, cujas fases são compostas por materiais cerâmicos, cimento, areia e brita. Já na Fig.2.6 (b) apresenta-se a metalografia de um material composto constituído de carbetos cementados de WC-Co. Este tipo de material é amplamente utilizado na confecção de ferramentas de corte para aços endurecidos, proporcionando às mesmas uma alta dureza e tenacidade, pois as duras partículas de carbetos, que são extremamente frágeis e capazes de suportar as tensões de corte, são unidas com uma matriz metálica, no caso o cobalto, que possui uma alta tenacidade.

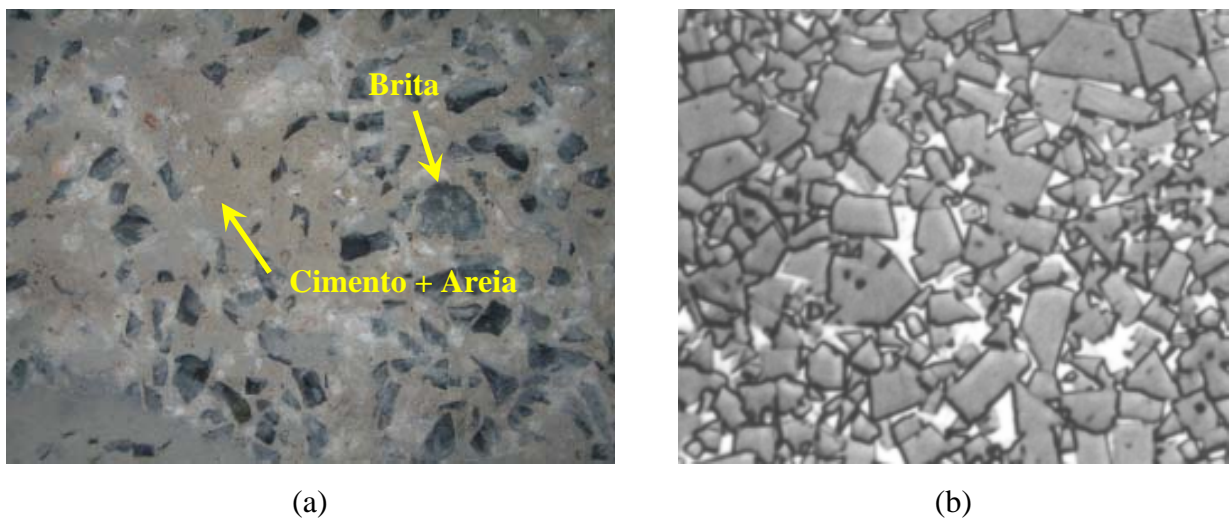


Figura 2.6 - Compostos reforçados com partículas: (a) Concreto; (b) Fotomicrografia de um carbetos cementados WC-Co. As áreas claras são a matriz de Cobalto e as áreas escuras dão as partículas de carbetos de tungstênio. Ampliação de 100 vezes. (adaptado de (CALLISTER Jr., 2002))

2.2.3 Compostos sanduíches

Os compostos sanduíches podem ser considerados como um caso particular de estratificado, sendo formados por duas placas de grande rigidez e de pequena espessura envolvendo uma alma de espessa de baixa resistência. O conjunto placa e alma formam uma estrutura de grande leveza e rigidez. Existem basicamente dois tipos de almas: cheias e vazadas, conforme exemplos ilustrados pelas figuras 2.7 e 2.8, respectivamente.

Os materiais mais utilizados para almas cheias são madeiras celulares, diversas espumas celulares, resinas carregadas de micro-esferas vazias de vidro denominadas espumas

sintéticas, plásticos, etc.. Os principais materiais utilizados nas almas vazias, essencialmente na forma de colméia de abelhas (alvéolos hexagonais) e perfis são: ligas metálicas leves, papel Kraft (com ou sem resina), papel poliamida e outros (GAY *et al.*, 2002).

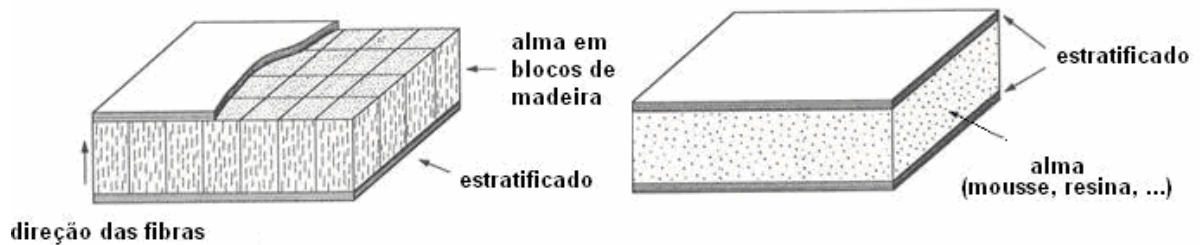


Figura 2.7 - Representação de compostos sanduíches com almas cheias (BERTHELOT, 1992).



Figura 2.8 - Representação de compostos sanduíches com almas vazias (BERTHELOT, 1992).

2.2.4 Outras Arquiteturas

Os materiais compostos com outras arquiteturas podem ser classificados como segue (BERTHELOT, 1992):

- Plásticos reforçados

São constituídos de resinas ou matrizes nas quais são introduzidos reforços do tipo:

- Fibras curtas;
- Bolhas cheias ou vazadas;
- Pós metálicos ou grafite.

Os reforços aumentam o módulo de elasticidade de um fator de 2 a 5. O comportamento mecânico destes materiais pode ser homogeneizado, e seu estudo será semelhante ao de um material isotrópico.

- Compostos volumétricos

Foram introduzidos para necessidades específicas da aeronáutica. São confeccionados a partir de tecelagem volumétrica e são muito onerosos. Entre os interesses específicos destaca-se a obtenção de características mecânicas elevadas, com um comportamento sensivelmente isotrópico em volume.

2.3 Aplicações industriais dos materiais compostos

Como já citado anteriormente, atualmente, os materiais compostos têm uma ampla gama de aplicações e vêm substituindo os materiais tradicionais, uma vez que as características individuais destes podem não atender às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade (GAY *et al.*, 2002).

Os materiais compostos atualmente se encontram em praticamente toda estrutura onde a leveza é um critério determinante. O número de aplicações de materiais compostos é amplo. Alguns dos principais exemplos de aplicações são: componentes eletrônicos, construção civil, transportes rodoviários, transportes ferroviários, transportes marítimos, transportes aéreos, indústria do petróleo, e materiais e acessórios esportivos.

Algumas destas aplicações são discutidas mais detalhadamente nas próximas seções.

2.3.1 Indústria aeroespacial

Na indústria aeroespacial, os materiais compostos foram introduzidos de forma definitiva a partir da década de 1960 com a introdução de compostos de alto desempenho. O desenvolvimento de fibras de carbono, boro e quartzo ofereceram aos projetistas e engenheiros a oportunidade de flexibilizar os projetos estruturais, atendendo mais facilmente às necessidades de desempenho em vôo de aeronaves e veículos espaciais. Em paralelo, os compostos carbono/carbono (compostos de Carbono Reforçados com Fibras de Carbono-CRFC) e tecidos de fibras de quartzo foram desenvolvidos e submetidos a severas condições

térmicas e de erosão, em cones dianteiros de foguetes, em partes externas de veículos submetidos à reentrada na atmosfera terrestre e em aviões supersônicos (REZENDE e BOTELHO, 2000).

Os avanços dos compostos criaram novas oportunidades para estruturas de alto desempenho combinado com baixo peso, favorecendo o desenvolvimento de sistemas estratégicos, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas (REZENDE e BOTELHO, 2000; GAY *et al.*, 2002).

No conflito do Iraque, na década de 1990, a indústria aeronáutica surpreendeu o setor tecnológico como o lançamento da aeronave F-117 (Fig. 2.9), construída de materiais compostos, fibras de carbono com matriz epóxi e bismaleimida, esta apresentando característica de uma baixa detectabilidade por radares, favorecendo a furtividade da aeronave. O projeto da aeronave, associada à utilização de materiais compostos e revestimentos que favoreceram a absorção da radiação eletromagnética na faixa de microondas, (REZENDE e BOTELHO, 2000).



Figura 2.9 - Aeronave F117 (<http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Usaf.f117.750pix.jpg> acessado em 15/03/2008).

Abaixo estão alguns exemplos de componentes fabricados com compostos na indústria aeronáutica:

- * Componentes estruturais (componentes de asas, empenagem e fuselagem);
- * Superfícies de controle (ailerons, spoilers);
- * Componentes exteriores (cones de cauda);
- * Componentes interiores (pisos, portas, divisórias).

Experiências mostraram que ao se substituir peças produzidas com materiais tradicionais por materiais compostos, há uma redução de peso variando de 10% a 50%, e uma redução de custos em cerca de 10% a 20%. Na aviação comercial, o fato dos materiais compostos terem boa resistência à corrosão proporcionou uma economia nos custos de manutenção (GAY *et al.*, 2002).

Nota-se no gráfico da Fig. 2.10 um aumento expressivo na utilização de materiais compostos na indústria aeronáutica entre os anos de 1982 e 2000, cerca de 20%, e diminuição do uso alumínio e do aço nas estruturas (GAY *et al.*, 2002).

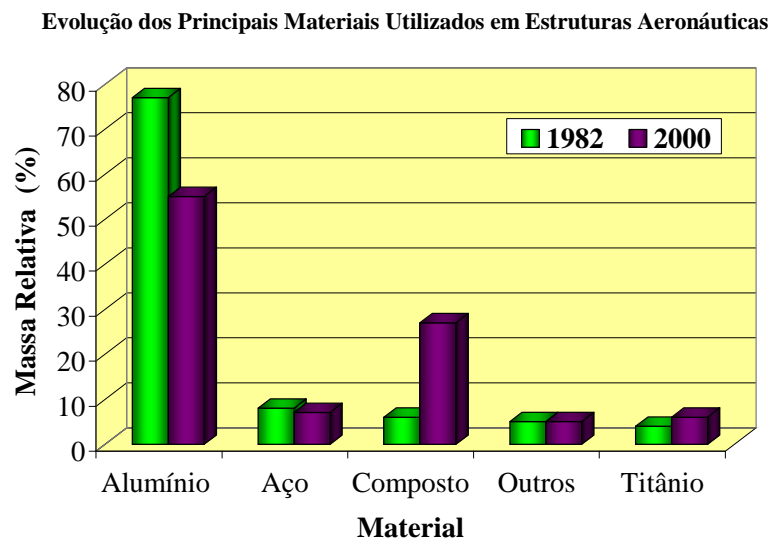
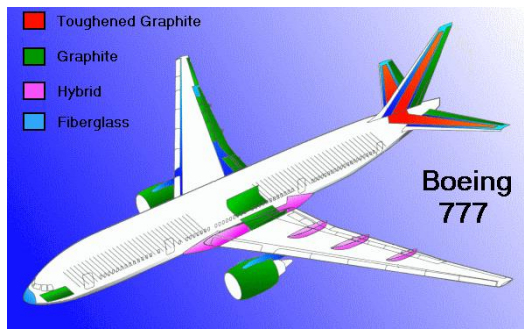


Figura 2.10 - Evolução da massa relativa dos principais materiais utilizados em estruturas aeronáuticas. (adaptado de (GAY *et al.*, 2002)).

A Figura 2.11 mostra a utilização de materiais compostos em aeronaves comerciais de grande porte da empresa Boeing, ficando evidente a tendência de aumento desta utilização em aeronaves mais modernas.

A Figura 2.12 apresenta a aeronave Tucano produzido pela EMBRAER, mostrando os componentes fabricados em compostos, utilizando como reforço fibras de carbono, Kevlar® e vidro.



(a)



(b)

Figura 2.11 - Figura 2.10 - Utilização de materiais compostos em aviações comerciais:

(a) Boeing 777 (<http://www.aviation-history.com/theory/composite.htm>, acessado em 15/03/2008); (b) Boeing 787 (<http://www.compositesworld.com/hpc/issues/2005/May/865>, acessado em 15/03/2008).

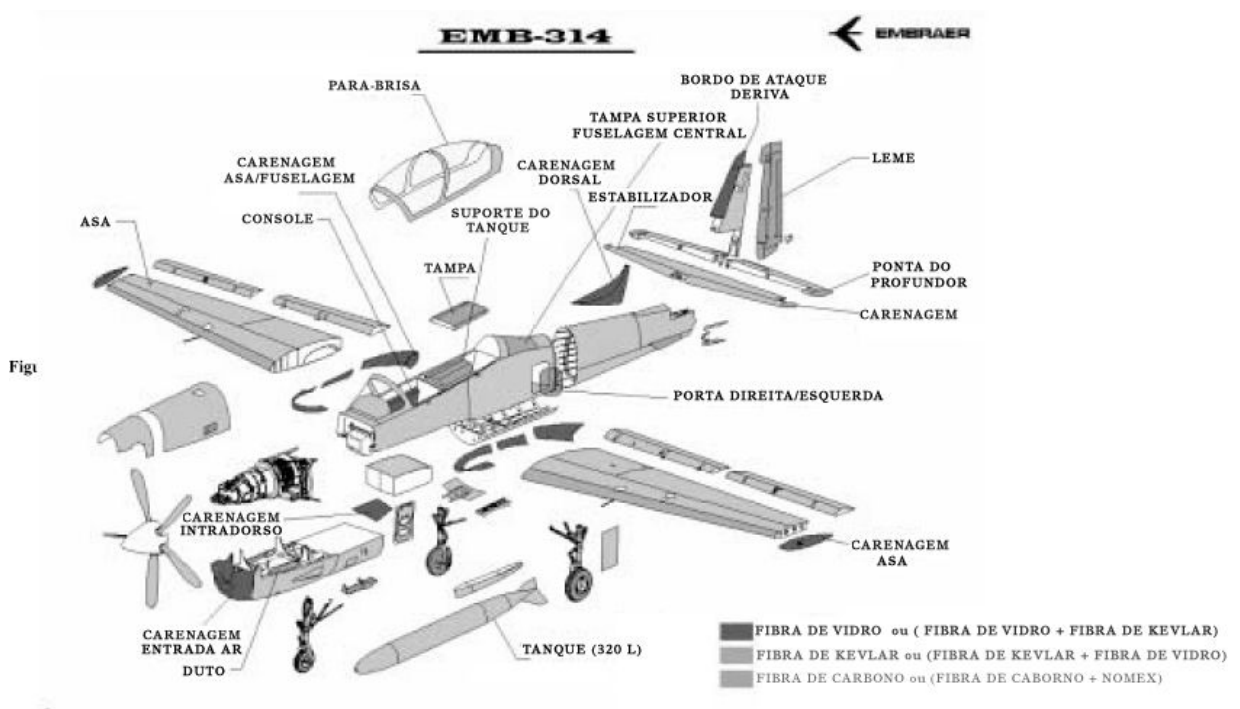


Figura 2.12 - Aeronave Tucano da EMBRAER (EMB-314) (REZENDE *et al.*, 2000).

No ano de 2004, o Airbus A380 (Fig. 2.13(a)), foi produzido com cerca de 25% de seu peso em compostos. Pela primeira vez na história da aviação, nesta aeronave utilizou-se um novo material composto chamado Glare na parte superior da fuselagem. Este material é constituído de finas lâminas de alumínio combinadas com fibras de vidro, resultando em um

composto 10% menos denso que o alumínio, o que assegurou uma redução no peso final do avião em cerca de 800 kg, permitiu uma autonomia de 15.000 km e reduziu em 15% os custos por passageiro em relação ao B747. Além disso, o Glare é mais resistente à corrosão, ao fogo e à fadiga (REZENDE *et al.*, 2000).

Já em 2008, tem-se a previsão da entrada do Boeing 787 *Dreamliner* no mercado, Fig. 2.13(b). Também este avião teve um aumento significativo de materiais compostos em sua estrutura, sendo produzido com 50 % de materiais compostos, 20% de alumínio, 15% de titânio, 10% de aço e 5% de outros materiais.



Figura 2.13 - Aeronaves de passageiros modernas: (a) Airbus A380 (http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Airbus_A380_Storm.jpg, acessado em 15/03/2008); (b) Boeing 787 *Dreamliner* http://pt.wikipedia.org/wiki/Boeing_787, acessado em 17/10/2007).

2.3.2 Indústria Petrolífera

Na indústria do petróleo, os materiais compostos oferecem uma série de vantagens para serviços *offshore*, como alta resistência ao desgaste e à corrosão, bom isolamento térmico, bom amortecimento, boa resistência mecânica e à fadiga. Uma razão adicional para a utilização destes materiais relaciona-se ao fato que os *risers* de aço utilizados em plataformas do tipo TLP (*Tension Leg Platforms*) normalmente não são convenientes em águas profundas. Isso porque, em geral, os aços não podem ser estendidos por mais de 1500 m. Em grandes profundidades tornam-se pesados e requerem um mecanismo que suporte uma grande solicitação axial, requerendo uma estrutura mais robusta, ou seja, uma plataforma maior. Então, a utilização de *risers* produzidos com materiais compostos (Fig.2.14 (a)) e tecnologia Tether em TLPs (Fig 2.14(b)) em águas profundas (lâminas d'água acima de 3000 m), proporcionam uma redução em torno de 37% dos custos totais de instalação. Isto se deve à

redução da tensão, minimizando a dimensão, o peso total, e o volume, além de propiciar uma melhor flutuação (OCHOA e SALAMA, 2005).

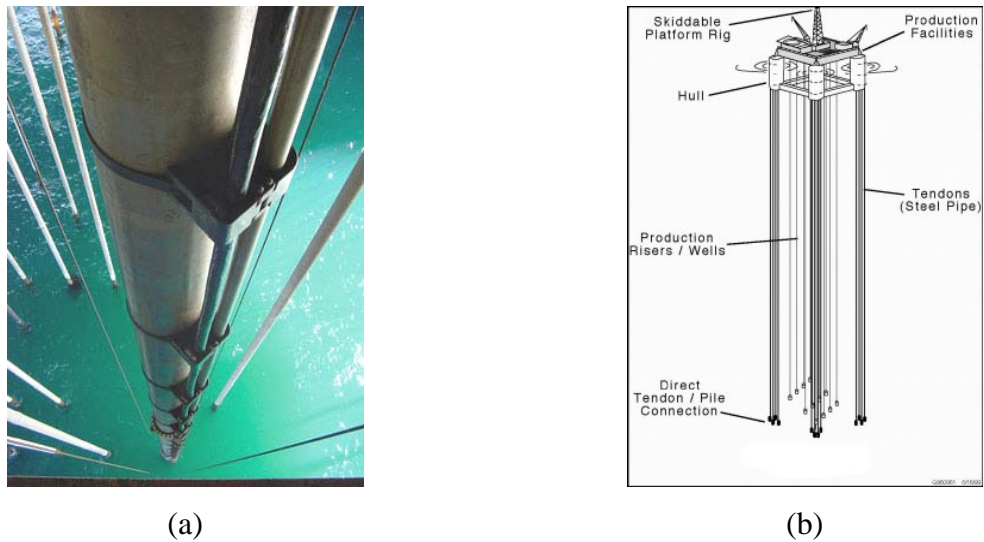


Figura 2.14 - (a) Riser produzido com material composto; (b) esquema de uma plataforma TLP (OCHOA e SALAMA, 2005)

2.3.3 Transporte Ferroviário

Os materiais compostos são frequentemente empregados em cabines de trens e componentes de interior, como poltronas e painéis. Nestes casos, os materiais compostos proporcionam uma melhor relação custo-benefício, além das peças, relativamente complexas, serem mais leves (Fig. 2.15) (KIM *et al.*, 2005).

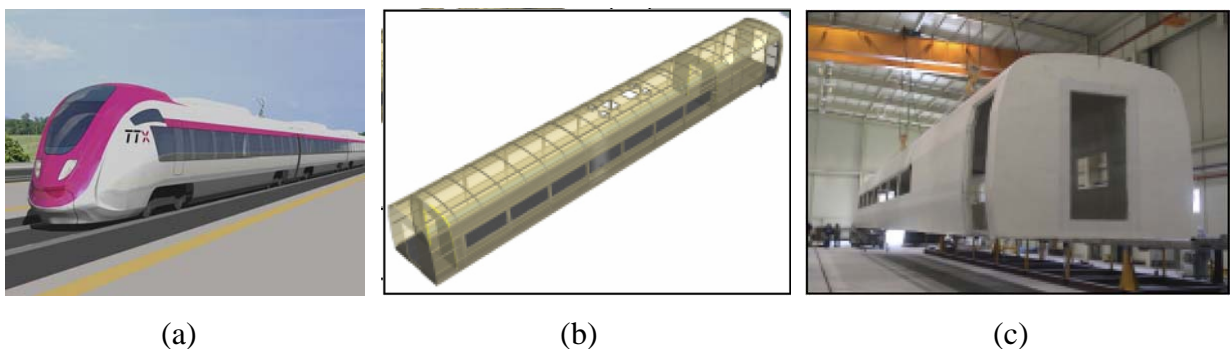


Figura 2.15 - (adaptado de (KIM *et al.*, 2005)) (a) Ilustração de um trem expresso coreano (b) estrutura em material composto (c) revestimento externo em material composto.

2.4 Mecanismos de Falhas em Materiais Compostos Laminados

Conforme mencionado anteriormente, devido às suas características intrínsecas, os materiais compostos apresentam um comportamento mecânico mais complexo que os materiais metálicos, incluindo-se suas características anisotrópicas. Além disso, os materiais compostos apresentam mecanismos de falha muito particulares, que não ocorrem em metais, como delaminação (Fig.2.16(a)) e descolamento (Fig.2.16(b)). Além disso, o processo de fabricação de compostos geralmente não é tão bem controlado como nos metais, o que torna estes materiais mais susceptíveis a defeitos de fabricação (MALLICK, 1997).

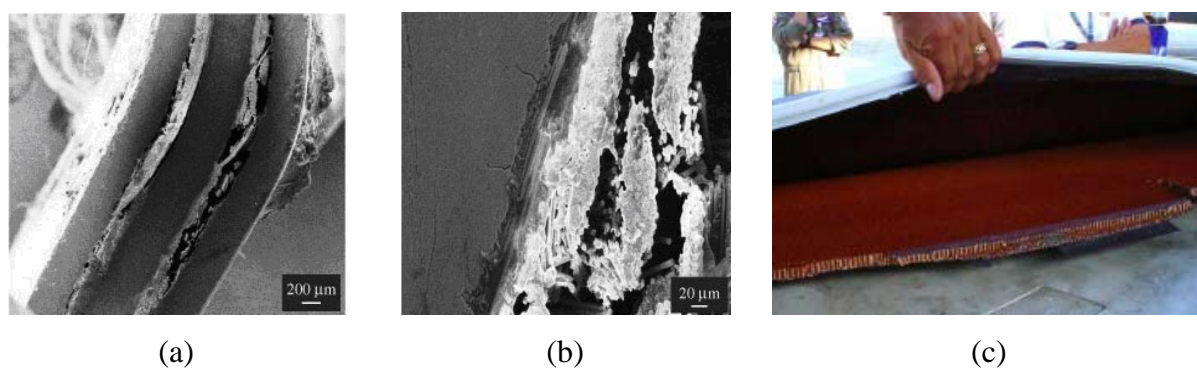


Figura 2.16 - Danos em materiais compostos: (a) e (b) Delaminação de uma estrutura composta, sendo (a) Glare e (b) Caral (adaptado de (BOTRELHO *et al.*, 2006)); (c) Descolamento em uma estrutura composta (Honeycomb) (http://www.agingaircraftconference.org/all_files/13/13d/143_doc.pdf acessado em 12/12/2007).

Defeitos ou falhas em materiais compostos podem ser causados durante a produção ou em serviço. Danos em partes de equipamentos confeccionadas com materiais compostos podem ser causados por carga estática excessiva, fadiga, impactos e fatores ambientais, como umidade e variações significativas de temperatura (DUAN *et al.*, 2001).

O dano mais comum encontrado nos materiais compostos laminados são os causados por impacto. Devido à baixa resistência interlaminar dos materiais compostos, degradações significativas podem ocorrer na região do impacto, tais como: trincas na matriz, delaminações, rompimento das fibras e descolamento.. Embora o rompimento de fibras seja o principal mecanismo de falha, este tipo de dano pode induzir à ocorrência de outros tipos, tais

como trincas da matriz e delaminação (NAIK *et al.*, 2000; DUAN *et al.*, 2001; BORG *et al.*, 2004).

Os impactos podem também ser classificados por faixas de velocidade: baixa, alta, balística e hiperveloz.

Os impactos de baixa velocidade são caracterizados quando a velocidade não ultrapassa 35 m/s, que é o caso de uma ferramenta caindo sobre uma parte da aeronave. Impactos de alta velocidade são aqueles compreendidos entre 35 e 270 m/s aproximadamente, exemplo de um pássaro colidindo com uma aeronave na decolagem ou aterrissagem; os impactos balísticos são os provocados por projéteis com velocidade acima de 270 m/s. Os impactos hipervelozes são os que ocorrem fora da órbita terrestre com velocidades superiores a 5000 m/s (SCHONBERG e YANG, 1993).

Especificamente em estruturas aeronáuticas, os componentes estruturais ficam submetidos a:

1. **Impactos de baixa energia:** causados pela queda de ferramentas durante a manutenção, por chuvas de granizo ou por pequenas pedras projetadas durante o pouso ou decolagem;
2. **Impactos de média energia:** provocados por colisões com pássaros;
3. **Impactos de alta energia:** causados por projéteis militares (ou altíssima velocidade).

Em impactos de alta energia, a penetração nas estruturas é total e a área afetada geralmente é pequena. Nos impactos de média energia, o local do dano é normalmente detectável, sendo este caracterizado por uma indentação local. Em impactos de baixa energia, apenas uma ligeira indentação aparece na superfície impactada. Nestes tipos de impacto os danos, normalmente, não são visíveis.

Geralmente, os compostos plásticos de fibras de carbono são sensíveis a impactos de média e baixa energia, que podem gerar trincas na matriz as quais, que por sua vez, podem conduzir ao processo de delaminação. Além disso, no lado oposto da estrutura na área em que foi impactada (na área sujeita a cargas de tração), é possível observar a ocorrência de rompimento de fibras, como ilustra a Fig. 2.17.

Parte da energia de impacto de baixa velocidade absorvida pelo composto é transmitida sob a forma de ondas de flexão e este mecanismo permite transmitir a energia a outros pontos distantes do ponto de impacto. Já para o caso de altas velocidades, como o

tempo de contato do projétil no material é curto, o comportamento do material será localizado sem deformação global da estrutura. Cantwell e Morton (1990) sugerem estes dois tipos de mecanismo, conforme ilustrado nas Fig. 2.18, visando identificar delaminações em vigas de vários comprimentos sob impactos de baixa e alta velocidade. Verifica-se que o tamanho do dano diminui com o aumento do comprimento da viga quando impactada a baixa velocidade. Em impactos a altas velocidades, o nível do dano independe do comprimento da viga, e com o aumento da relação altura da queda e massa da estrutura, as condições de contorno da viga poderão ser desprezadas.

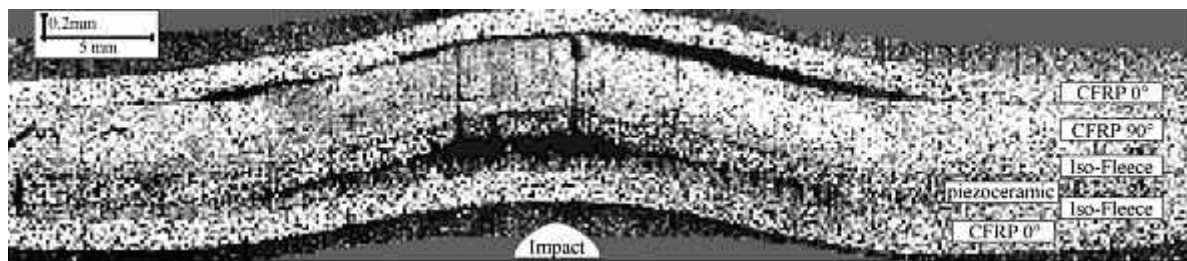


Figura 2.17 - Falha causada por impacto em material composto (MONTALVÃO *et al.*, 2006).

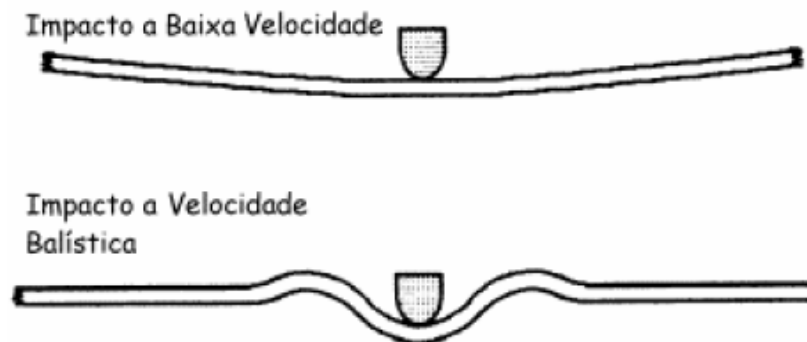


Figura 2.18 - Representação da deformação global em impacto a baixa velocidade e deformação local em impacto a alta velocidade (WRIGHT *et al.*, 1993).

2.4.1 Efeito do Dano Sobre as Flexibilidades

Uma das particularidades do material composto em relação aos demais materiais é sua capacidade de assegurar suas funções na presença de um dano importante. O termo dano aqui utilizado é entendido como sendo a criação de microfissuras ou de microvazios do material. A

evolução destas microfissuras conduz ao aparecimento de uma microfissura que pode levar à delaminação interlaminar e até mesmo à ruptura da estrutura. A modelagem do dano geralmente considera a criação e evolução das microfissuras inter-fibras, e não a ruptura das fibras ou descoesão fibra-matriz. O aparecimento destas microfissuras afeta as propriedades elásticas da monocamada, o que leva à necessidade de se expressar as flexibilidades da monocamada em função das variáveis do dano nos modelos numérico-computacionais.

Tais danos aqui considerados estão ligados à fissuração da matriz paralelamente às fibras. Segundo o modo de abertura destas fissuras, as flexibilidades irão ser afetadas com uma redução de seus valores. Se a fissura ocorrer no plano (1,2) ou (L,T), a variável de dano é definida por:

$$D_I = -\frac{\Delta E_2}{E_2}, \quad (2.1)$$

que implica uma redução do módulo de elasticidade longitudinal.

Para o caso da abertura da fissura ocorrer por cisalhamento, a variável do dano é definida por:

$$D_{II} = -\frac{\Delta G_{12}}{G_{12}}, \quad (2.2)$$

que implica uma redução dos módulos de elasticidade transversais.

Estas modificações nas propriedades de flexibilidade (ou de rigidez) deverão ser incorporadas nos modelos adotados para o estudo do comportamento do material composto.

É importante destacar que a formulação acima põe em evidência o fato que, do ponto de vista do comportamento mecânico macroscópico, o dano é associado a uma redução da rigidez (aumento da flexibilidade) do material composto. Estas variações, por sua vez, implicarão variações das características dinâmicas. De modo geral, as técnicas de SHM buscam, em um procedimento inverso, obter informações sobre a presença e intensidade do dano a partir de um conjunto de respostas dinâmicas medidas experimentalmente.

CAPÍTULO III

TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Neste capítulo serão descritas algumas das principais técnicas de monitoramento de integridade estrutural, sendo também apresentada uma breve revisão de algumas das principais publicações recentes a elas relacionadas.

3.1. Introdução

Uma das aplicações prática interessantes das técnicas de SHM é a possibilidade de realizar um prognóstico de falha, que é a estimação da vida útil de um sistema. Na Figura 3.1(a), podem-se observar falhas ocasionadas pela colisão dos navios USS Denver com o petroleiro USNS Yukonm, no ano de 2000. Um dos desafios do prognóstico de falha, neste caso, é avaliar os danos causados em outros sistemas do navio e, através destas informações, estimar sua vida útil (FARRAR *et al.*, 2005).



Figura 3.1 Ilustração de danos causados por acidente com o Navio USS Denver (FARRAR *et al.* 2005).

Outro desafio das técnicas de SHM é avaliar o surgimento de falhas incipientes em um sistema qualquer e monitorar sua evolução, como falhas comumente encontradas em estruturas aeronáuticas, trincas causadas por fadiga (Fig.2.2(a)), corrosão (Fig. 2.2(b)), descolamento em materiais compostos (Fig.2.2(c)).

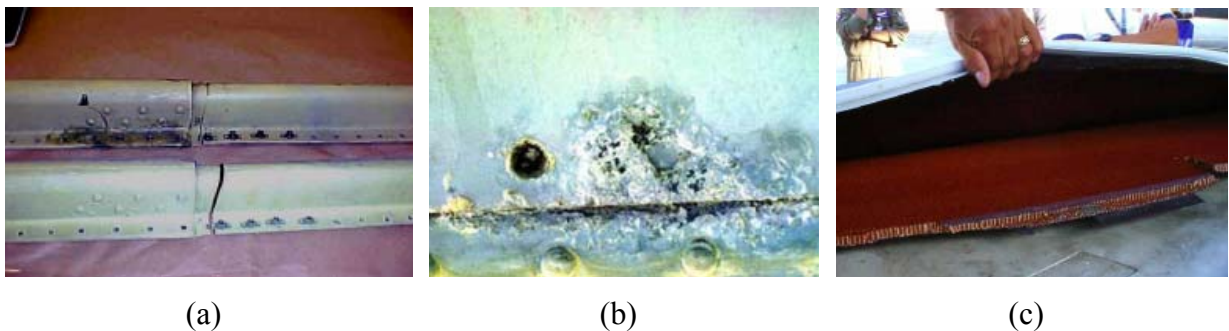


Figura 3.2 Falhas em estruturas aeronáuticas (http://www.agingaircraftconference.org/all_files/13/13d/143_doc.pdf acessado em 12/12/2007): (a) trinca em longarina de asa; (b) corrosão próxima rebites, (c) descolamento em uma estrutura composta (colméia).

As conseqüências de uma falha imprevisível em um sistema podem ser verificadas na Figura 3.3, que ilustram uma ocorrência em 1988, quando um avião Boeing 737, pertencente à companhia Aloha Airlines, perdeu parte superior da fuselagem durante o vôo. Este dano foi

ocasionado por trincas, as quais ocorreram devido à fadiga e foram agravadas pela corrosão, combinada com a falta de manutenção da aeronave (FARRAR *et al.*, 2005).



Figura 3.3 - Acidente ocorrido em 1988: Avião Boeing 737 (Aloha Airlines) (FARRAR *et al.*, 2005).

O exemplo mais recente é o desastre com o ônibus espacial Columbia da NASA (Fig. 3.4), que se desintegrou ao reentrar na atmosfera terrestre, matando os sete tripulantes a bordo. Foi averiguado, por filmagens e fotografias, que pouco após o lançamento, em 16 de janeiro de 2003, um grande pedaço de espuma isolante desalojado do tanque externo de combustível atingiu a parte frontal da asa do ônibus espacial. Este impacto provocou o desprendimento de algumas placas de proteção térmica no casco interno da nave, sendo que estas têm a função de proteger o veículo das altas temperaturas (chegando a 2.000 °C) na reentrada da atmosfera. Sem a proteção, o gás atmosférico superaquecido em forma de plasma penetrou pelos pontos danificados, invadindo regiões internas da nave causando, conseqüentemente, a falha total da aeronave (PEAIRS, 2006).

Análises após o acidente mostraram que o monitoramento de integridade estrutural poderia ter mudado este final trágico do Columbia, já que este poderia ter proporcionado informações adicionais para complementar as imagens realizadas do impacto do ônibus espacial. Ou mesmo um método avançado de SHM poderia ter identificado e localizado os danos. Atualmente, a NASA está utilizando os sistemas de monitoramento de integridade estrutural em sua frota e em futuros veículos espaciais (PEAIRS, 2006).



Figura 3.4 Ônibus Espacial Columbia (NASA) a) Lançamento do ônibus; (b) Desintegração do ônibus na reentrada da atmosfera. (<http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL112846-5603,00.html>)

Estes acontecimentos realçaram a necessidade de utilização de técnicas de SHM.

Várias técnicas não destrutivas vêm sendo utilizadas para detecção, localização e caracterização da dimensão e do tipo do dano em diferentes tipos de estruturas, incluindo as constituídas de materiais compostos.

A finalidade dos ensaios não-destrutivos é inspecionar, qualificar (rejeitar ou aceitar), e avaliar a integridade de uma estrutura sem danificá-la, destruí-la ou nela produzir significativas mudanças. Os métodos de inspeção não destrutiva para materiais compostos variam entre uma simples inspeção visual até técnicas mais sofisticadas como aquelas baseadas em fibras ópticas e em transdutores piezelétricos. Muitas destas técnicas foram desenvolvidas para detecção de falhas em metais e mais recentemente, com algumas modificações, vêm sendo aplicadas a materiais compostos. As modificações foram necessárias para ajustar as diferentes características existentes entre os metais e compostos. Por exemplo, materiais metálicos normalmente são isotrópicos e homogêneos, ao passo que os materiais compostos são não-isotrópicos e heterogêneos. Na sua maioria, os materiais compostos têm estrutura laminada, fato que conduz a tipos específicos de danos, como delaminação e descolamento, que não ocorrem em metais. Além disso, o processo de fabricação de compostos geralmente não é bem controlado como nos metais. (MALLICK, 1997)

A qualidade, no contexto dos ensaios não-destrutivos, é definida em termos de danos ou defeitos, podendo ambos ser microscópicos ou macroscópicos, que podem ser gerados

durante a fabricação ou durante o funcionamento da estrutura devido sobrecarga, fadiga, impacto, etc. Em princípio, um bom método de ensaio não-destrutivo tem que ser capaz de detectar a presença de falhas, analisando a influência destas no desempenho e na confiabilidade da estrutura (MALLICK, 1997).

A seguir serão apresentados alguns métodos não destrutivos de monitoramento de integridade estrutural.

3.2 Técnicas baseadas nas respostas vibratórias

As primeiras investigações em detecção de falhas a partir de dados de vibrações foram publicadas bem antes do estabelecimento de análise modal experimental como uma técnica popular e prática. Uma revisão geral dos métodos de detecção de falhas baseados em respostas vibratórias foi apresentada por Friswell e Penny (1997). Foram abordados métodos que utilizam três tipos básicos de medidas de respostas dinâmicas: no domínio do tempo, no domínio da frequência e no domínio modal.

O emprego de técnicas baseadas em análise modal experimental para detecção de danos surgiu da constatação de que as alterações nas propriedades estruturais ocasionadas pelo dano exercem influência sobre as características modais (frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais). No entanto, constata-se, na grande maioria dos casos, uma baixa sensibilidade das características modais com relação ao dano em seu estado incipiente, o que limita a aplicação destas técnicas a situações – de menor interesse prático - em que o dano se apresenta em estado avançado (MONTALVÃO *et al.*, 2006).

A baixa sensibilidade mencionada leva também à necessidade de se operar com parâmetros modais de alta qualidade (em termos de sua precisão), a fim evitar que os resultados sejam invalidados pela inevitável presença de incertezas numéricas e experimentais. A baixa sensibilidade em questão é determinada pelo fato que a análise modal tradicional é limitada à faixa de baixas frequências, nas quais os modos de vibração apresentam comprimentos de onda muito superiores às dimensões do dano. Por outro lado, técnicas baseadas nas respostas dinâmicas em faixas de altas frequências apresentam geralmente melhor desempenho em virtude dos pequenos comprimentos de onda envolvidos (MONTALVÃO *et al.*, 2006).

Métodos baseados nas frequências naturais dividem-se em duas categorias: métodos diretos e inversos (MONTALVÃO *et al.*, 2006). O problema direto consiste em determinar como variam as frequências naturais, no caso da ocorrência um caso de dano (que pode incluir localização, extensão e tipo). Tipicamente, os danos são modelados numericamente e as frequências naturais são obtidas experimentalmente, fazendo-se uma comparação entre estes dados. Os problemas inversos consistem em determinar parâmetros associados ao dano, a partir de mudanças nos parâmetros modais, geralmente com o emprego de um modelo estrutural que estabelece relações entre estes dois tipos de entidades.

Lifshitz e Rotem (*apud* Doebling *et al.* (1996)) publicaram em 1969 um artigo que pode ter sido o primeiro a propor a utilização das medidas de vibração para detectar danos em elastômeros.

Mal *et al.*, 2005 apresentam uma metodologia para detecção e localização de danos. No caso, a estrutura monitorada foi instrumentada com uma rede de atuadores e sensores e para excitar e adquirir respostas dinâmicas, incluindo vibrações e efeitos de propagação de ondas. A resposta vibratória é composta pelas características modais da estrutura, enquanto, no tocante à propagação de ondas, tem-se um conjunto de sinais devidos a ondas ultra-sônicas que se propagam na estrutura. A localização e a severidade do dano são determinadas utilizando índices de correlação, calculados a partir das FRF da estrutura sem dano e com dano, definidos segundo:

$$D_{i,j,DL} = \left| 1 - \frac{\{R_i\}_{DL}^T \times \{R_j\}_{DL}}{\{R_i\}_{DL=0}^T \times \{R_j\}_{DL=0}} \right|,$$

onde DL é o nível do dano ($DL=0$ para ausência de danos) e $\{R_i\}_{DL}$ é o vetor resposta da estrutura no ponto de controle i pra um determinado nível de dano DL .

Este método foi aplicado a vigas de alumínio e placas de materiais compostos, nas quais os danos eram simulados por diminuição da rigidez e por impacto, respectivamente. Os ensaios de impacto nos materiais compostos foram realizados com equipamento Instron-Dynatup 8250 com uma ponta de formato esférico e 12,7 mm de diâmetro (Fig. 3.5). A energia de impacto nos corpos de prova foi de 21,47 J e velocidade de 2,71 m/s. Os resultados obtidos neste experimento mostraram que as delaminações devido ao impacto modificam o padrão das ondas elásticas e que, apesar das limitações destas técnicas, o índice definido tem

um potencial significativo, reduzindo tempo e custos de inspeção, se aplicado a grandes estruturas.



Figura 3.5 - Equipamento de Impacto Instron – Dunatup 8250 e detalhes da ponta do impactador. (MAL et al., 2005)

Shu e Della (2004) estudaram vibrações livres em vigas com múltiplas delaminações utilizando um modelo analítico baseado teoria de vigas de Euler-Bernoulli. A influência do tamanho e localização das delaminações sobre os dois primeiros modos naturais (frequências e formas modiais) foi discutida.

Kisa (2004) investigou os efeitos de múltiplas trincas nas propriedades dinâmicas em uma viga de composto CFRP. Os modelos teóricos integram mecânica da fratura e subestrutura acopladas, onde as trincas são modeladas como molas. Os efeitos da localização e profundidade das fissuras, da fração volumétrica e da orientação das fibras sobre as frequências naturais e modelos de vigas com trincas transversais foram pesquisados. O autor afirma que a abordagem pode ser utilizada para a análise dos efeitos não-lineares, tais como a interface de contacto que ocorre quando a trinca se fecha.

Tippetts e Hemez (2005) desenvolveram modelos de elementos finitos para previsão de danos provocados por impacto em placas de compostos. Os modos de falha utilizados são *ply splits* (uma combinação de trincas na matriz e descolamento com rompimento de fibras) e delaminação. O modelo estrutural da placa utiliza formulação de elementos finitos com um modelo de zona coesiva para simular possíveis fraturas na superfície, característica de danos provocados por impacto. Este modelo foi validado com testes experimentais.

Lichtenwalner e Sofge (1998), utilizaram as leituras dos sinais de vibração (magnitude e fase de funções de transferência) obtidas a partir de transdutores piezoelétricos na detecção de falhas em estruturas compostas com auxílio de uma métrica do dano. Utilizaram uma estrutura de material composto constituída de fibra de vidro e matriz epóxi que tem a função de conectar as pás do rotor ao rotor de helicóptero. Foi simulado um dano a partir de um impacto com uma esfera com 12,7 mm de diâmetro e 1,32 kg em queda livre, sendo que as alturas variavam entre 304,8 a 914,4 mm. Repetiu-se o impacto nos mesmos pontos para visualização do aumento da delaminação. Após o impacto fez-se inspeção com ultra-som.

3.3 Técnica baseada na impedância eletromecânica

Por se tratar da técnica empregada no trabalho de pesquisa reportado nesta Dissertação, o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica será descrito com maior detalhamento nesta seção.

Esta técnica foi primeiramente proposta Liang *et al.* (1994), e tem sido aplicada como uma ferramenta promissora na avaliação de danos em tempo real (RAJU, 1997). O método utiliza o acoplamento eletromecânico dos materiais piezelétricos. Para a obtenção do sinal de impedância utiliza-se tanto o efeito inverso como o efeito direto dos materiais piezelétricos (PARK, INMAN, 2005).

O efeito direto, também chamado “efeito sensor” 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 inverso, ou “efeito atuador”, implica que o material piezelétrico, sujeito a um potencial elétrico externo, desenvolve deformações geométricas. Para um material piezelétrico com comportamento linear, as relações constitutivas envolvendo as variáveis elétricas e mecânicas são expressas pelas equações 3.1 e 3.2, que indicam o efeito inverso e direto, respectivamente (RAJU, 1997; PARK e INMAN, 2005).

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (3.1)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (3.2)$$

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 piezelétricas em deformação [m/V]; ϵ : permissividade elétrica [F/m];

i, j, k, m : índices que indicam as componentes dos vetores e tensores envolvidos nas equações.

As propriedades piezelétricas são definidas utilizando três eixos ortogonais, sendo duas destas direções isotrópicas (mesmas propriedades em todos os pontos destas direções) e a outra é associada com a direção de polarização, conforme apresentado na Figura 3.6. Para aplicação da técnica da impedância eletromecânica, um transdutor piezelétrico consistindo geralmente de uma lâmina de cerâmica PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) é colada na superfície da estrutura monitorada. Nesta configuração, as deformações são produzidas nas direções X_1 e X_2 para um campo elétrico aplicado transversalmente na direção X_3 . Este é o mecanismo empregado para geração de ondas elásticas na estrutura monitorada.

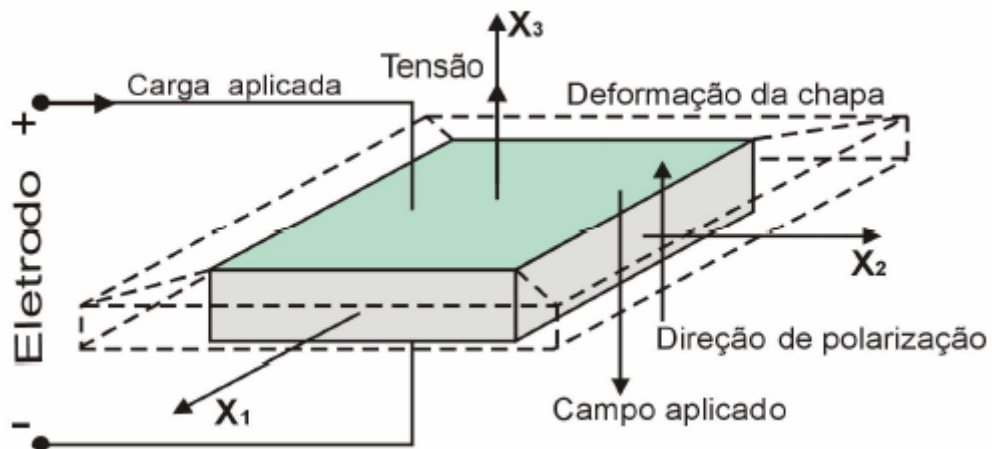


Figura 3.6 - Direções dos eixos principais para materiais piezelétricos (TEBALDI et al., 2006)

Como as frequências de excitação são altas, a resposta dinâmica da estrutura atua em uma área pequena em torno do atuador. A resposta da vibração mecânica é transferida de volta para o PZT em forma de resposta elétrica. Quando uma trinca modifica a resposta dinâmica (alteração da fase, da frequência ou da magnitude), isto é manifestado na resposta elétrica do PZT (PARK e INMAN, 2005).

Na Figura 3.7 está esquematizado um sistema unidimensional eletromecânico do sistema estrutura-PZT.

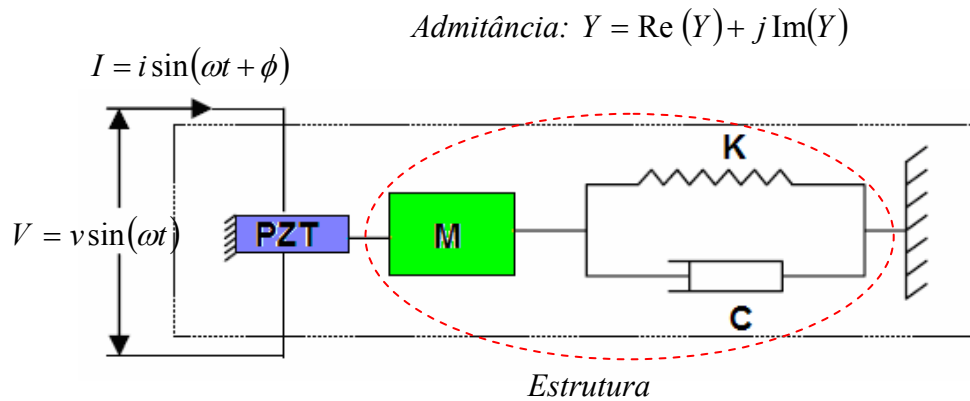


Figura 3.7 - Modelo unidimensional utilizado para representar a pastilha piezoelétrica – sistema dinâmico estrutural.

Partindo do pressuposto de que as propriedades mecânicas do PZT não variam com o tempo, pode-se demonstrar que a admitância $Y(\omega)$ do sistema é uma função combinada da impedância mecânica do atuador, $Z_a(\omega)$, e da estrutura, $Z(\omega)$, sendo dada por:

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i \omega a \left(\bar{\varepsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (3.3)$$

onde: $Y(\omega)$: admitância elétrica do atuador PZT (inverso da impedância); $Z_a(\omega)$ e $Z(\omega)$: impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura, respectivamente; 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 da 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 20 kHz), e pequenas voltagens (<1V) que são aplicadas ao PZT.

A Figura 3.8 mostra alguns componentes de uma montagem experimental para monitoramento de integridade estrutural baseada na técnica da impedância eletromecânica e ilustra uma função de impedância obtida com o analisador de impedância.

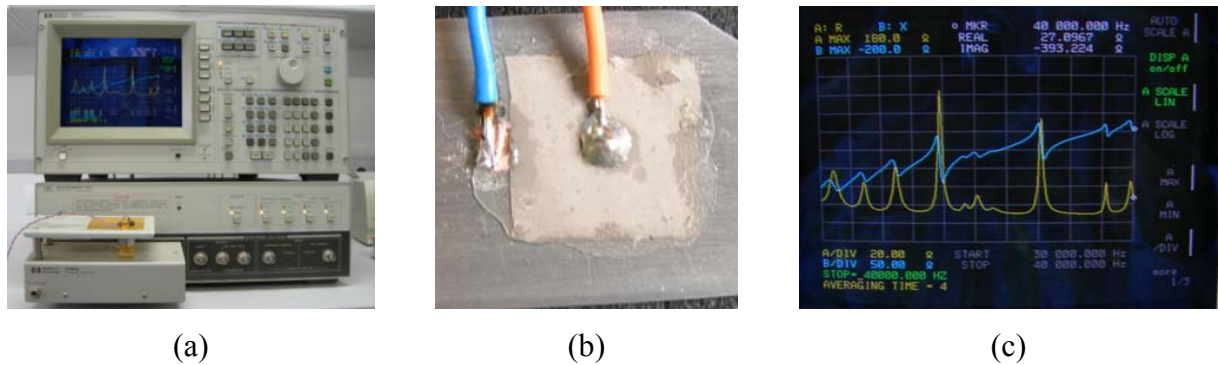


Figura 3.8 - Componentes do aparato experimental para leitura da impedância: (a) analisador de impedância; (b): pastilha piezolétrica acoplada à estrutura; (c): curvas de impedância (parte real e parte imaginária) na tela do analisador.

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. Muitas formulações matemáticas são utilizadas para definir os vários tipos de métrica existentes (RAJU, 1997), algumas delas se mostrando mais eficazes que as outras, notadamente no tocante à sua sensibilidade com respeito à ocorrência do dano.

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

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{[\operatorname{Re}(Z_{i,1}) - \operatorname{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\operatorname{Re}(Z_{i,2})]^2} \right)}, \quad (3.4)$$

onde M é a métrica do dano, $Z_{i,1}$ e $Z_{i,2}$ designam as funções de impedância medidas para a estrutura em duas condições, intacta e danificada, respectivamente, e n indica o número de frequências na banda de observação.

As principais vantagens do método de impedância em relação a outras técnicas são (PARK e INMAN, 2004):

- * A técnica não é baseada em qualquer modelo, e com isso pode ser aplicada a estruturas complexas;
- * A técnica utiliza pequenos atuadores não-intrusivos, adequados para monitorar locais inacessíveis;
- * Os transdutores de PZT mostram excelentes características em condições normais de trabalho: têm uma ampla faixa de linearidade, resposta rápida, pouco peso, alta eficiência de conversão, e boa estabilidade a longo prazo;
- * Devido ao fato de operar em as altas frequências, a técnica é muito sensível a pequenas alterações locais (danos incipientes);
- * Os dados resultantes das medidas são facilmente interpretados;
- * A técnica pode ser implementada para o monitoramento de integridade *on-line*;
- * A técnica é adaptada para o monitoramento contínuo, que pode reduzir o número de paradas para manutenção.

Encontram-se na literatura diversos estudos dedicados a diferentes aspectos relacionados à técnica de monitoramento baseado na impedância eletromecânica. Alguns dos mais recentes são relacionados a seguir.

Park *et al.*, (2003), apresentam uma estudo geral do método de monitoramento de integridade estrutural no qual as características de *hardware* e de *software* são resumidos, incluindo perspectivas futuras de desenvolvimento e aplicações.

Grisso *et al.*, (2004), utilizaram o método da impedância eletromecânica na detecção de inícios de trincas transversais na matriz de compostos de grafite/epóxi. Pastilhas de cerâmica piezolétrica foram coladas em amostras de compostos (no caso, vigas) e foram utilizadas duas bandas de frequências de excitação, de 10 a 20 kHz e 40 a 60 kHz. Para detecção da severidade do dano, utilizou-se a desvio da raiz média quadrática (RMSD- *Root Mean Square Deviation*). Estes autores concluíram que testes de emissão acústica mostraram

uma boa correlação com o dano apenas para amostras mais espessas e o teste da impedância mostrou melhores correlações para amostras mais finas.

Peairs *et al.* (2005), desenvolveram um novo modelo de impedância eletromecânica para monitoramento de integridade estrutural, combinando método dos elementos espectrais (*SEM-spectral element method*) com análise do circuito elétrico. Estes autores discutem que o método SEM tem várias vantagens sobre os métodos de elementos finitos convencionais, pois produz modelos mais precisos em altas frequências de vibrações. No entanto, a modelagem de altas frequências é mais complexa devido à ocorrência de ressonância das pastilhas piezelétricas. Os sensores multiplexadores para transferência de impedância e modelagem de altas frequências foram investigados.

Simmers *et al.*, (2005) utilizaram o método da impedância para detectar e aumento de trincas incipientes superficiais devidas à corrosão. Três tipos de métricas foram utilizados, uma similar à que é utilizada por Park (1999), o desvio da raiz médias quadrática (RMSD) e uma correlação cruzada (*Cross Correlation*). Os resultados experimentais obtidos em uma viga de alumínio mostraram que o método da impedância eletromecânica é eficaz na detecção e monitoramento de corrosão, tendo sido observada uma correlação entre as métricas e locais de ocorrência do dano.

Grisso *et al.*, (2005), aplicaram o método da impedância eletromecânica no monitoramento de trincas transversais em materiais compostos grafite/epóxi [0/90]_s. Para a simulação da trincas foi utilizado a equipamento para ensaio de tração, dotado de uma célula de carga de 50 kN. As bandas de frequência utilizadas foram 10-20 kHz e 40-60 kHz. Os autores verificaram que geralmente a escolha da bandas de frequência mais adequadas tem ligação com a região que apresenta a maior quantidade de picos. Como métrica de dano utilizou-se o desvio da raiz média quadrática (RMDS). Os resultados permitiram observar a correlação linear entre a métrica do dano e o surgimento de trincas. Para comprovar os resultados obtidos pelo método da impedância utilizou-se o método de inspeção visual baseado em líquido penetrante e raios-X.

Zagrai e Giurgutiu (2005) utilizaram o método da impedância eletromecânica na detecção de danos em placas circulares de alumínio, simulando trincas, com auxílio de eletroerosão, a diferentes distâncias dos sensores piezelétricos. Os autores utilizaram várias métricas na análise de dados: o desvio da raiz média quadrática (RMDS), o desvio da porcentagem absoluta da média (*MPAD-mean absolute percentage deviation*), mudança da covariância (*CC-convariance change*), desvio do coeficiente de correlação (*CCD-correlation*

coefficient deviation). Foi encontrado que na banda de frequências de 300-450 kHz, a métrica CCD se mostrou linearmente correlacionada com a localização do dano.

Lopes *et al.*, (2000), utilizaram o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância integrado com redes neurais artificiais para detectar e localizar danos estruturais. Nos experimentos, foram utilizadas vigas conectadas por parafusos para simular a quarta parte da estrutura de uma ponte, e também uma treliça; os danos eram simulados nas estruturas diminuindo-se o aperto destes parafusos e retirando-se uma das partes, respectivamente. As investigações experimentais mostraram que esta metodologia é capaz de detectar e localizar danos, e que a técnica poder ser aplicada em estruturas complexas para as quais a geração de modelos e a utilização de FRFs são impraticáveis.

Moura e Steffen, (2005), tentaram identificar a melhor banda de frequências para o método da impedância eletromecânica em estruturas flexíveis. Os danos foram simulados em uma viga engastada de alumínio, mediante acréscimos de massa na extremidade livre. Analisando os resultados, os autores acreditam que a melhor banda de frequência se encontra, nas condições utilizadas, na faixa de 15 KHz .

Moura (2004), encontrou uma condição ótima de monitoramento de integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica, para um modelo de falha simples. Posteriormente, fez para uma combinação de várias falhas avaliadas, a fim de identificar uma banda de frequência de análise que seja mais robusta na identificação de falhas em estruturas tipo viga, utilizando um procedimento de otimização multiobjetivo, através da técnica conhecida como otimização de compromisso e algoritmos genéticos. Desenvolveu dois tipos de metamodelagem, uma que utiliza conceitos de redes neurais probabilísticas e outro baseado em superfície de resposta e metamodelagem estatística, para classificação da falha em estruturas tipo viga. Utilizou a técnica da impedância em estruturas complexas, no caso uma empenagem vertical do veículo não tripulado Acauã, utilizando a técnica de Taguchi para retirar possíveis erros do procedimento experimental, utilizando também os conceitos de redes e superfície de resposta e meta modelagem estatística para classificação das falhas.

Mais recentemente, Moura Jr. (2008), utilizou o método da impedância eletromecânica aplicada em juntas flangeadas, estruturas de avião comercial, nestes utilizou algumas metodologias de Altshuller para estabelecimento de alguns parâmetros. Desenvolveu um sistema de monitoramento remoto de medição dos sinais de impedância através da internet, os sinais eram acessados por um sistema de gerenciamento de sinais utilizando um servidor de internet, com base de dados mysql e com scripts PHP e Javascripts. O autor utilizou o método

da impedância e ondas de Lamb para monitoramento da corrosão em vigas de alumínio. Utilizou o método de SHM de impedância no monitoramento de estruturas espaciais, uma estrutura tubular foi exaustivamente avaliada para geração de um procedimento automático de detecção de condições de monitoramento baseado em algoritmos genéticos. Posteriormente, a técnica foi aplicada em um satélite toroidal inflável. Inicialmente, uma viga de alumínio é monitorada quanto ao processo de corrosão pontual, dentro de uma câmara de variação de pressão atmosférica e temperatura. A intenção desta etapa foi a de avaliar o processo de corrosão em alumínio sob alterações de pressão e temperatura, em ambientes similares aos encontrados em vôo. Depois, no pilone do F-15 foram avaliadas as condições de monitoramento, utilizando a técnica de robustecimento de Taguchi, no qual posteriormente é apresentada a influência dos carregamentos (tensão) nos sinais de impedância adquiridos. Dois tipos diferentes de hélices de helicóptero foram testadas em dois tipos de falhas (cortes e furos) e metamodelos específicos baseados em redes neurais probabilísticas foram criados.

Palomino (2008) utilizou diferentes métricas encontradas na literatura aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural da impedância eletromecânica, procurando identificar características destas diante das aplicações realizadas. Primeiramente avaliaram-se estas métricas em um ensaio com uma placa de alumínio e posteriormente em uma fuselagem de uma aeronave, nesta produzindo-se um dano retirando um rebite. Foi realizado um teste de hipótese para verificar estatisticamente a sensibilidade das métricas. Utilizou-se a técnica da impedância em ensaio de fadiga com corpos de prova de alumínio, sendo empregado um metamodelo para correlacionar as métricas de dano medidas com o número de ciclos usado nos ensaios.

3.4 Ondas de Lamb

Uma abordagem que tem recebido muita atenção nos últimos anos é a utilização de ondas de Lamb. Estas são perturbações elásticas que podem propagar em grandes áreas de chapas sólidas com condição livre-livre com baixa dispersão de energia, mesmo em materiais com alta atenuação. Este tipo de onda foi pela primeira vez descrita na teoria por Horace Lamb (1917), embora este cientista nunca as tenha produzido. Alleyne e Cawley (1992) foram os primeiros a discutir interação das ondas de Lamb com defeitos no contexto de ensaios não destrutivos.

O monitoramento da estrutura é realizado aplicando-se um campo elétrico alternado na pastilha piezelétrica PZT colada à estrutura. Esta, funcionando como atuador, deforma-se conjuntamente com a estrutura emitindo uma onda acústica. Esta onda é transmitida através da estrutura até chegar a outra pastilha PZT colada na estrutura, funcionando como receptor, que por sua vez, se deforma na mesma frequência da onda acústica emitindo um sinal elétrico para a leitura. Quando há a presença de danos, mudam-se as propriedades de propagação da onda acústica, alternando o sinal de leitura da pastilha PZT receptora. O princípio básico consiste em monitorar a variação da propagação das ondas de Lamb, causada por uma falha estrutural.

Para extração das características fundamentais, o sinal adquirido é processado (pela transformada de *wavelet*, por exemplo), como pode ser observado na Figura 3.9.

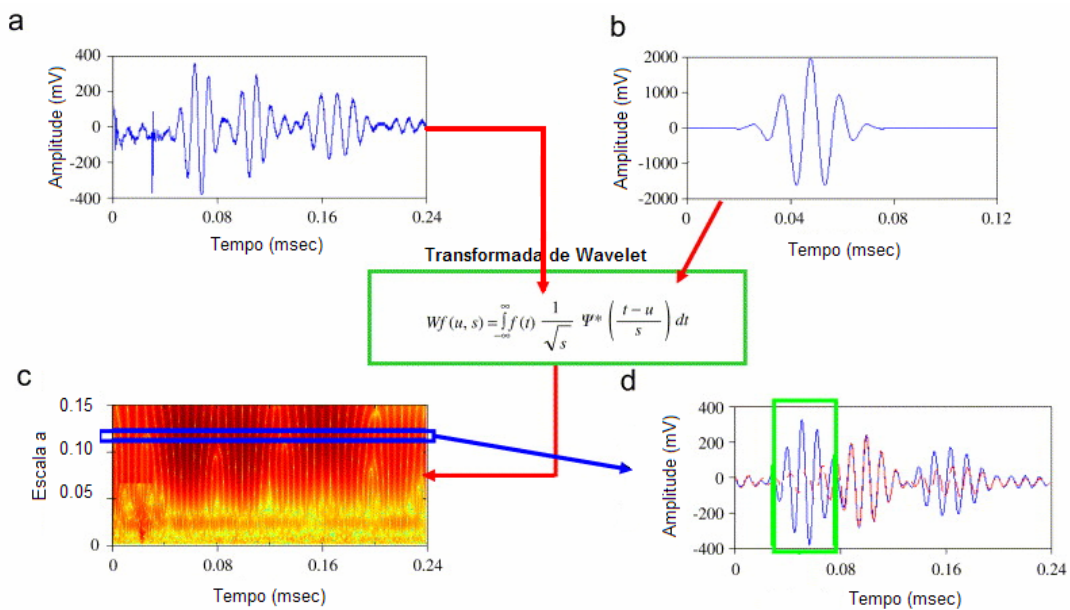


Figura 3.9 - Procedimento de análise do sinal resposta. (a) sinal Resposta no tempo; (b) onda de Morlet; (c) informação de tempo-frequência; (d) resposta no tempo na frequência de entrada. (Adaptado de Sohn, 2007).

Existem várias investigações acerca da sensibilidade das ondas de Lamb na detecção de falhas em materiais compostos laminados. Wilcox *et al.* (2000) propuseram a inspeção de placas metálicas utilizando uma rede de transdutores piezelétricos que atuavam como transmissores e receptores. Sinais dirigidos (*guided signals*) eram gerados em diferentes

ângulos em torno da posição dos transdutores e o sinal refletido indicava a presença de danos. Esta configuração é promissora em materiais isotrópicos. No entanto, tem limitações em estruturas constituídas de materiais compostos com fibras orientadas. Díaz *et al.* (2000) e Saravanos *et al.* (1994) demonstraram que uma rede de sensores pode ser efetivamente utilizada para detectar delaminações em placas de compostos com base no princípio das ondas de Lamb.

Kessler *et al.* (2002) afirmam que as técnicas das ondas de Lamb fornecem mais informações sobre tipo, severidade e a localização do dano que outros métodos previamente testados que utilizam FRFs, as ondas de Lamb se mostrando mais sensíveis aos defeitos estruturais locais. Pastilhas piezocerâmicas foram utilizadas para excitar o primeiro modo anti-simétrico das ondas de lamb (modalidade A0). Os autores exploraram a otimização das ondas de Lamb na detecção de danos em materiais compostos, abordando os problemas de escolha adequada da frequência de atuação, forma do pulso e geometria dos sensores para aplicação nas ondas de Lamb. Os resultados foram comparados executando-se a decomposição da onda em *wavelet* de Morlet, apresentando-se graficamente as magnitudes dos coeficientes na frequência aplicada. Embora ondas de Lamb exibam grandes capacidades de detecção e localização danos, estes autores apontam, como principal desvantagem deste método, o fato de ser ativo, isto é, de requerer uma tensão produzida por um gerador de funções. Outro requisito é a elevada taxa de aquisição de dados necessária para uma melhor resolução do sinal. Ainda segundo os autores, este método deve idealmente ser aplicado em conjunto com outro método passivo de detecção, devido à dificuldade de se interpretar os dados obtidos através da técnica de ondas de Lamb.

Ricci *et al.*, (2004), apresentaram uma metodologia automática para identificação e localização de danos em estruturas constituídas de materiais compostos. Os danos foram causados por impacto, e a identificação destes se baseou no cálculo do índice de correlação obtido pela análise do sinal de frequência, obtido pelos sensores de pastilhas piezelétricas.

Sohn. *et al.*, 2004, propuseram a utilização de monitoramento de integridade estrutural para detecção de danos em estruturas compostas combinando propagação de ondas de Lamb, método da impedância eletromecânica e métodos acústicos, utilizando um sistema comum de sensor-atuador para inspeção não destrutiva local. No estudo apresentado, as características de atenuação das ondas, identificadas através de um índice *wavelet*, são utilizadas para localizar a região de danos. Os danos foram introduzidos pelo disparo de um pequeno projétil em diferentes localizações sobre uma placa quadrada constituída de composto com matriz epóxi e

fibras de carbono, sendo os experimentos realizados com diferentes velocidades. Verificou-se que os três métodos estudados podem se complementar de forma eficiente. No caso, a propagação de ondas de Lamb é eficaz para placas finas, o método da impedância é mais adequado para detectar danos em conexões estruturais.

Diamandi *et al.*(2004) investigaram a detecção de danos em materiais compostos causados por impactos de baixa energia utilizando método de ondas de Lamb. Para isto utilizaram uma placa de material composto laminado de polímero reforçado com fibras de carbono de dimensões 488 mm × 184 mm com espessura 2,3 mm, e pastilhas piezelétricas para geração e recepção das ondas anti-simétricas de Lamb, A_0 . O impactador é de formato esférico com diâmetro de 12,5 mm, e a placa foi impactada no centro repetidamente com níveis progressivos de energia: 5 J, 8 J, 10 J, 12 J, 15 J. A cada estágio, a placa era monitorada e inspecionada por ultra-som tipo C. Com isso demonstrou-se que as ondas de Lamb podem ser utilizadas no primeiro estágio na detecção global e localização de danos juntamente com técnicas mais sensíveis de ensaios não destrutivos, como ultra-som tipo C e radiografia.

3.5 Fibras ópticas

Sensores ópticos vêm sendo desenvolvidos e utilizados desde o final do ano de 1970 e vieram a ser aplicados com mais maturidade durante a revolução das telecomunicações no final da década de 1990. As fibras ópticas são utilizadas em uma grande variedade de aplicações. No entanto, são limitados pela intensidade e comprimento de onda. Em muitas aplicações de monitoramento estrutural, os sensores ópticos oferecem vantagens significativas quando comparadas com outras técnicas como, por exemplo: são livres de interferências magnéticas, têm alta sensibilidade, não acrescentam peso significativo, são adaptados à telemetria, e podem ser facilmente embutidos nos materiais, especialmente nos compostos (Todd, 2002)

Até o início da década de 1970, a aplicação principal de fibras ópticas era para instrumentos de endoscopia. A partir de experimentos descritos por Vali e Shortill em 1976, mostrando que interferômetros ópticos poderiam ser fabricados a partir de fibras, e dos trabalhos de Rogers que, em 1977, mostrou-se que uma única fibra óptica poderia ser usada

como sensor, a variedade de medidas detectadas por fibras ópticas cresceu rapidamente, assim como o número de transdutores que foram utilizados (Moszkowicz, 2005).

A fibra óptica é um filamento de material dielétrico que consegue prender radiação óptica em uma extremidade e guiá-la até a outra, ou seja, uma guia de ondas, que pode estar integrada com outro componente eletro-óptico com a função de sensor que pode, por exemplo, detectar alguma mudança na propriedade óptica. Estas mudanças podem ser causadas, em particular, por alguns tipos de falhas (trincas e deformações), fato que justifica a utilização de fibras ópticas nos procedimentos de monitoramento de integridade estrutural. Coberturas de plástico são adicionadas para aumentar a resistência mecânica em ambientes normais, mas outros tipos de coberturas como, por exemplo, materiais metálicos e cerâmicos, possibilitam aumentar a gama de ambientes onde as fibras podem ser usadas. (Moszkowicz, 2005).

Mckenzie *et al.* (2000), propuseram a utilização de fibras ópticas associadas à técnica de *Bragg grating* no monitoramento de trincas e delaminações em estruturas aeronáuticas e após a reparação destas, mostrando que o método é capaz de detectar estes tipos de danos.

Ambu *et al.* (2005), utilizaram três métodos de ensaios não destrutivos na detecção de dano em materiais compostos laminados submetidos a impactos de baixa energia: dois métodos ópticos, o procedimento holográfico e a técnica de interferometria de *speckles*, e comparou os resultados pela técnica de ultra-som. No procedimento experimental utilizou-se um equipamento de impacto com uma esfera na ponta de 12,5 mm de diâmetro e placas de compostos foram impactadas com três níveis de energia e velocidade. Os autores concluíram que os dois métodos ópticos são capazes de identificar danos provocados por impacto, no caso, delaminações.

3.6 Ultra-som

Os ensaios por ultra-som constituem uma técnica de avaliação não destrutiva que utiliza ondas ultra-sônicas de alta frequência. Frequências maiores que 10^9 Hz já foram geradas. No entanto, os equipamentos para caracterizar falhas operam na faixa entre 10^6 a 10^7 Hz. As frequências superiores a 5×10^7 Hz são utilizadas para a investigação de propriedades dos materiais. Esta técnica é amplamente utilizada e tem um custo relativamente baixo. Sua principal dificuldade é a necessidade de um profissional qualificado, que seja capaz de

calibrar o equipamento e que saiba analisar os resultados de forma correta. (Bray e McBride, 1992).

Algumas vantagens desta técnica são: possibilidade de identificação visual de descontinuidades internas em materiais opacos e de descrição das características das falhas internas. Além disso, é possível a visualização tridimensional em tempo real em uma grande variedade de condições de teste, a custos relativamente baixos. Em vários casos, somente uma superfície precisa ser inspecionada (Bray e McBride, 1992).

Meo *et al.* (2003) encontraram um modelo matemático para representação do mecanismo de impactos de baixa-velocidade, com o intuito de primeiramente conduzir testes e, posteriormente, projetar um material mais resistente a impactos. Para comprovar este modelo foi realizado um experimento com um painel com estrutura tipo colméia de dimensões $0,381 \text{ m} \times 0,3048 \text{ m}$ com espessura de $0,00635 \text{ m}$. Para o experimento de impacto foi utilizada uma esfera com diâmetro de 16 mm , a energia incidente de impacto foi de 8 J . Após o impacto foi efetuada a inspeção por ultra-som tipo C, sendo possível visualizar uma área de delaminação de $396,5 \text{ mm}^2$ e a profundidade da cavidade de $1,48 \text{ mm}$. Na simulação do painel sanduíche foi utilizado o código de elementos finitos LS-DYNA3D. A partir da simulação obteve-se uma área de delaminação de $354,8 \text{ mm}^2$ e profundidade da cavidade de $1,58 \text{ mm}$.

Honsur *et al.*, 2007, submeteu placas de laminados de carbono/epóxi com dimensões de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ com espessura de 2 mm , a impactos de baixa energia com condições ambientais distintas (temperatura e umidade), utilizando um instrumento de teste de impacto (Dynatup Modelo 8210) equipado com sistema de aquisição de sinais GRC 930-I. O equipamento de impacto tinha uma ponteira esférica com diâmetro de $12,5 \text{ mm}$, e as energias utilizadas foram de $15, 30$ e 45 J . Foram comparados parâmetros de impacto, como pico da carga e energia absorvida, para determinação do dano nas placas de compostos. Estas foram subseqüentemente submetidas a inspeção por ultra-som. Os autores concluíram que existe influência das condições ambientais na evolução dos danos provocados por impacto em materiais compostos.

Angelidis e Irving, 2007, estudaram a técnica do potencial elétrico para localizar e determinar a dimensão das delaminações causadas por impactos de baixa energia em materiais compostos de polímeros reforçados com fibras de carbono. As amostras utilizadas tinham dimensões de $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ e espessura de 2 mm , constituídas de 7 camadas $[0_2/45_2/90_2/-45_2]_2$, e nelas foi colada uma rede de eletrodos para realização do experimento.

Após os impactos, foram realizadas inspeções por ultra-som tipo C para verificar a correlação das leituras do potencial elétrico com os danos causados. As energias incidentes nos corpos de prova foram de 2 a 12 J. A partir de simulações numéricas e experimentais, os autores concluíram que o método é eficaz na detecção de danos provocados por impacto em materiais compostos. No entanto, este detecta delaminações apenas na primeira e segunda camada, e demonstraram também que existe influência da orientação das fibras e da direção de propagação na capacidade de detecção de delaminações.

3.7 Raios-X

O método de inspeção por raios-X é uma técnica não destrutiva e bem sucedida na detecção de falhas em materiais e estruturas. Uma imagem radiográfica é basicamente uma sombra bidimensional projetada ou uma distribuição de intensidades de raios-X que atravessam o objeto em avaliação. Assim, o objeto é capaz de atenuar a radiação de acordo com a massa, tipo e tamanho da falha. Então, a projeção mostrada será uma distribuição de radiação que varia de acordo com o defeito existente. Esta radiação resultante da análise pode ser visualizada com filme fotográfico, telas fluorescentes, ou imagens digitalizadas apresentadas em televisões ou telas de computadores. Os comprimentos de onda dos raios-X são muito curtos, cerca de 10^{-10} a 10^{-7} cm e a técnica pode ser utilizada para investigar não intrusivamente materiais metálicos ou não metálicos, com uma ampla variação de espessuras. A geração dos raios-X é feita arremessando elétrons a elevadas velocidades sobre um alvo metálico, que geralmente é o tungstênio incorporado no cobre, para os sistemas de identificação de falhas. (Bray and McBride, 1992).

No processo convencional de radiografia, durante a obtenção de uma imagem, os raios-X divergem de uma única fonte para projetar a sombra de uma pessoa ou um objeto em um filme. No entanto, elementos estruturais são claramente separados em um objeto tridimensional, o que pode ocultar na radiografia, dificultando a visualização da estrutura quanto das falhas. (Bray e McBride, 1992).

Como vantagem da radiografia sobre as outras técnicas não destrutivas, inclui-se a capacidade de verificar visualmente a descontinuidade de materiais sólidos. Peças de geometrias complexas, que seriam difíceis de serem submetidas ao método por ultra-som, por exemplo, podem facilmente, desde que acessíveis os dois lados da peça, ser submetidos ao

processo de radiografia. Com o equipamento adequado é possível fazer avaliações em tempo real, em vistas de vários ângulos, permitindo a visualização tridimensional, através de montagens usando tecnologia de tomografia computacional (Bray e McBride, 1992).

As desvantagens, entretanto, surgem da necessidade de acesso aos lados opostos da estrutura a ser avaliada. Para se ter uma boa definição da falha é necessário que as fissuras estejam quase paralelas ao feixe de raios-X. Enquanto os vazios nas peças são óbvios para qualquer observador, descontinuidades marginais são de observação complexa e necessitam de um profissional com ampla experiência. O processo é caro, além de não ser imediata a coleta dos dados, há dispêndio de tempo para avaliação dos resultados. As delaminações são na maioria das vezes não verificáveis. Algumas estruturas, por causa da emissão de radiações, impedem o uso desta técnica. (Bray e McBride, 1992).

3.8 Metamodelagem e reconhecimento de padrões por Redes Neurais Artificiais

A utilização de redes neurais no procedimento de localização de danos e em SHM foi motivado pelas existências dos diversos tipos de falhas em diferentes localizações em uma mesma estrutura, visto que o processo de detecção de falha é complexo.

Hangud e Luo (1997) utilizaram a rede neurais *feed-forward* com três camadas para identificação de dois tipos de falhas in GFRPs (poliéster reforçado com fibras de vidro), nas sujeitas a delaminações e redução da rigidez, causadas por trincas transversais ou por impacto. Admitindo que existe apenas um destes defeitos em cada instante, produziram-se modelos analíticos para prever o comportamento dinâmico da estrutura considerando vários cenários de falha. A rede neural principal identifica o tipo de falha presente, utilizando um critério de resposta dinâmica não-linear, que direciona o problema para uma de duas sub-redes que utilizam FRFs com entrada.

Zheng *et al.*, (2004) combinaram mecanismos computacionais e redes neurais, neste caso o método de *backpropagation*, para detectar delaminações em vigas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*). As redes neurais foram treinadas com modelos de elementos finitos, assumindo-se várias dimensões localização de delaminações. Como entrada, utilizaram-se as cinco primeiras frequências naturais. Segundo os autores, as redes neurais foram eficazes na predição da dimensão e localização das delaminações com uma pequena margem de erro.

Kesaven *et al.*, 2007, utilizaram um sistema de monitoramento de integridade estrutural juntamente com redes neurais para detectar delaminações e prever sua localização e dimensão em estruturas compostas. No caso foi utilizada uma viga e uma junção em T, utilizada em navios. Foram desenvolvidos modelos de elementos finitos destas estruturas com delaminações. Paralelamente, utilizaram-se *strain gages* no interior e na superfície da estrutura para caracterização das condições da estrutura e do dano (Fig.3.10). Realizaram-se testes experimentais para comprovar os resultados obtidos por elementos finitos. As redes neurais foram utilizadas juntamente com um programa de pré-processamento desenvolvido, cujo algoritmo é ilustrado na Figura 3.11.

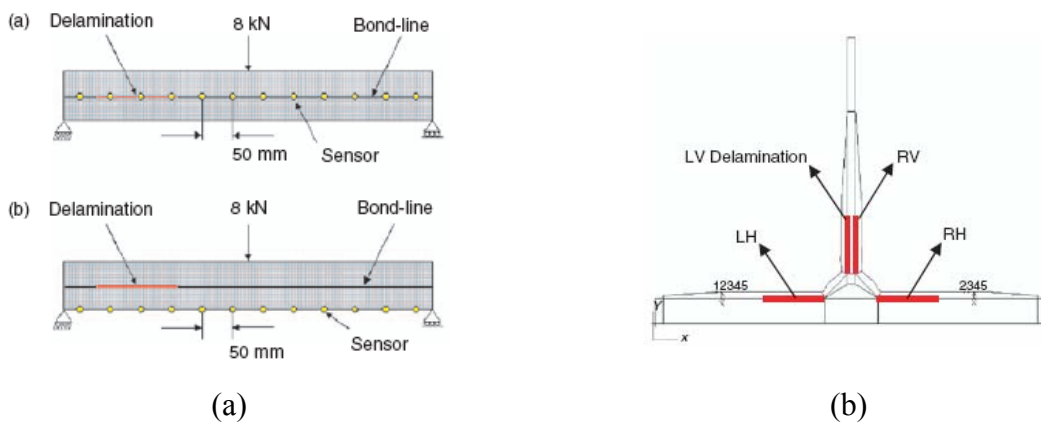


Figura 3.10 - (a) configuração de colagens dos sensores; (b) cenário de falhas da junta em T. (KESAVEN *et al.*, 2007)

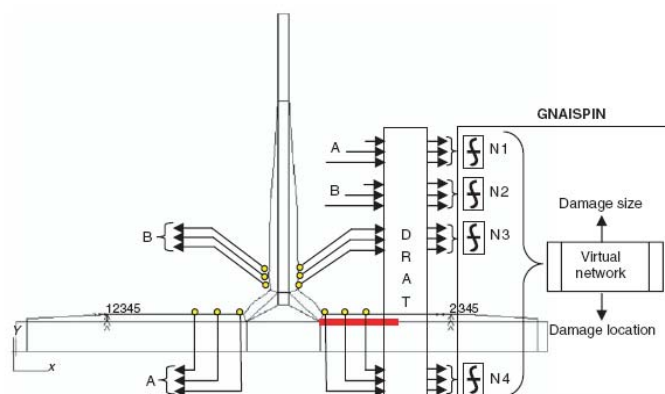


Figura 3.11 - Esquema do algoritmo que combina sub-redes com a rede global (KESAVEN *et al.*, 2007).

CAPÍTULO IV

EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE ENSAIO

Este capítulo descreve a metodologia empregada nos ensaios experimentais, incluindo o projeto e construção do dispositivo concebido para aplicação de impactos nos corpos de prova.

4.1 Descrição do Equipamento Experimental

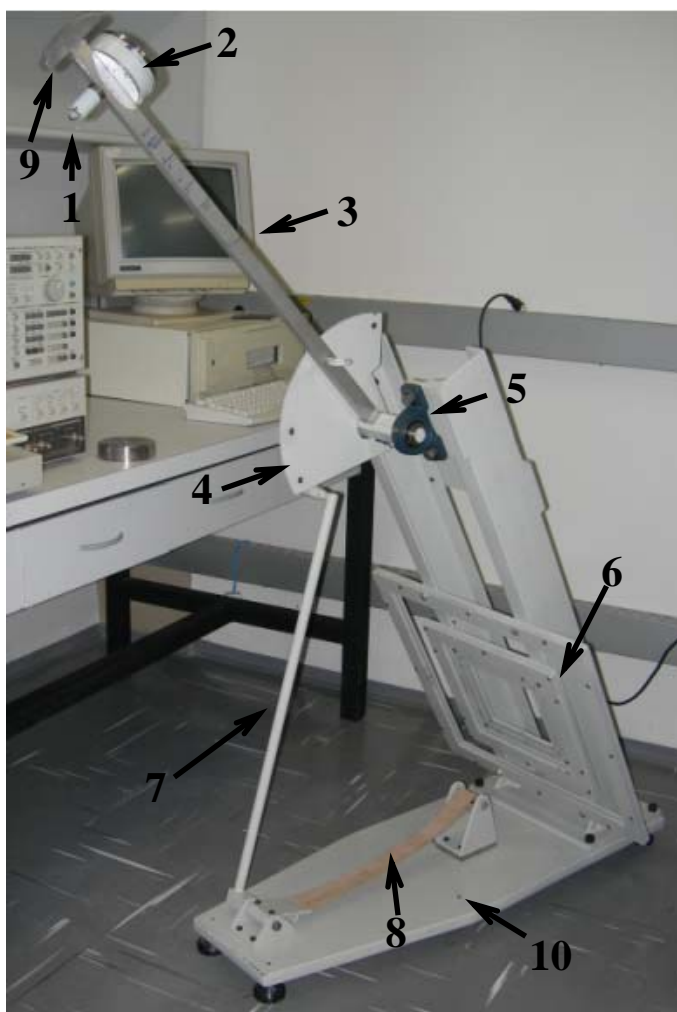
Para realização dos ensaios de impacto nos corpos de prova foi necessário o projeto e a construção de um equipamento que permitisse a adequada fixação e aplicação de impactos nos corpos de prova dentro de uma faixa relativamente ampla de energia.

Optou-se por um dispositivo de configuração pendular, mostrado na Figura 4.1, o qual permite obter valores desejados da energia de impacto mediante a variação da altura a partir do qual o pêndulo é liberado (esta altura sendo determinada pelo ângulo de inclinação da haste, indicado por uma placa demarcada), a massa da haste (foram construídas duas hastes de mesmo comprimento, sendo uma de aço e outra de alumínio), além de massas adicionais confeccionadas sob a forma de discos de massa conhecida que podem ser fixados à extremidade da haste do pêndulo. Os valores das massas disponíveis são indicados na Tab.4.1.

Ao pêndulo é fixada a ponteira que impacta diretamente o corpo de prova, tendo sido esta ponteira confeccionada com geometria semi-esférica, com dois diâmetros distintos (12,5 mm e 25,4 mm), de acordo com recomendações encontradas na literatura (MAL *et al.*, 2005;

LICHTENWALNER e SOFGE, 1998; AMBU *et al.*, 2005; DIAMANDI *et al.*, 2004; HONSUR *et al.*, 2007) e dados fornecidos pela EMBRAER.

A Figura 4.2 ilustra em detalhes alguns dos componentes principais do dispositivo de impacto.



1. Ponta 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 4.1 – Dispositivo pendular para aplicação de impactos

Tabela 4.1 - 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



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2 – (a): massas extras; (b) marcador angular da haste do pêndulo; (c) hastes do pêndulo (comprimento 740 mm) em aço ABNT 1020 (3,400 kg) e alumínio (0,902 kg) ; (d) ponteiros de impacto.

As placas de material composto são fixadas ao aparato por meio de molduras confeccionadas com cantoneiras de aço presas por parafusos no aparato, ilustradas na Fig. 4.3. Diferentes molduras foram confeccionadas de modo a possibilitar a fixação de corpos de prova de diversas dimensões, a saber: $20 \times 20 \text{ cm}^2$, $30 \times 30 \text{ cm}^2$ e $50 \times 50 \text{ cm}^2$.

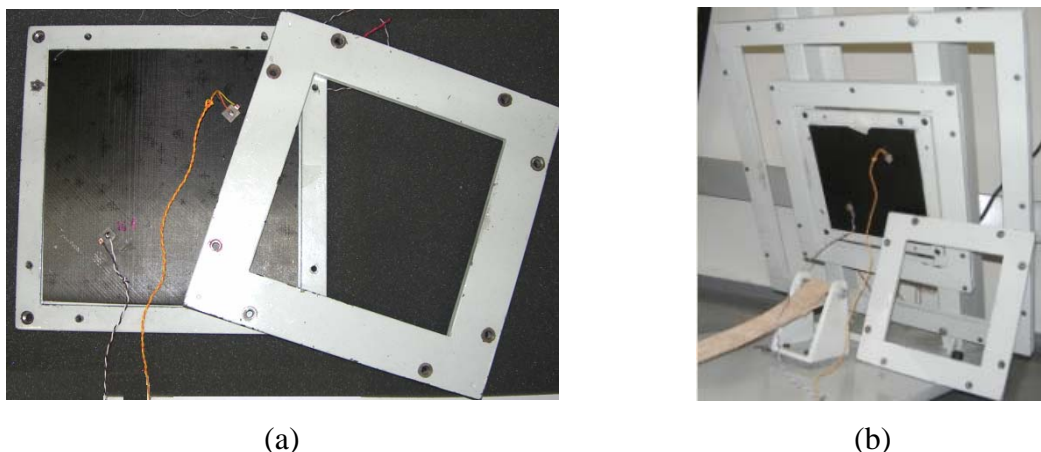


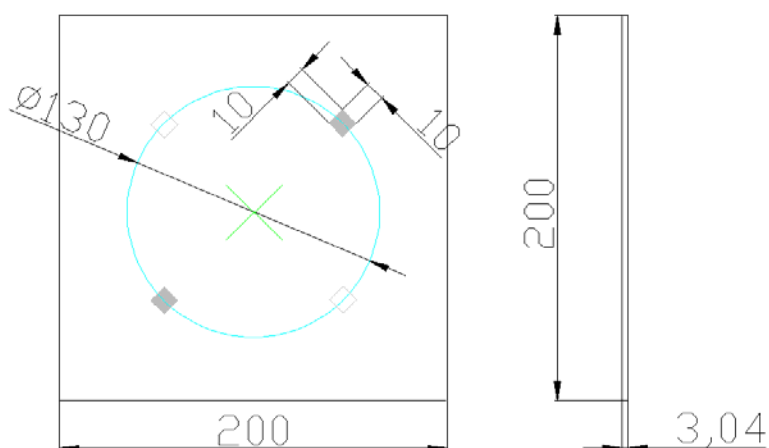
Figura 4.3 – Molduras de fixação dos corpos de prova: (a) Moldura de 20×20 cm² ;
(b) Molduras fixadas no dispositivo pendular.

Com o objetivo de evitar que os corpos de prova sejam impactados mais de uma vez, eles são posicionados sobre barras em perfil laminado “U” inclinadas. Além disso, o dispositivo dispõe de um sistema de frenagem, consistindo de uma correia de couro que é posta em contato com a sapata montada na extremidade livre da haste do pêndulo quando a correia é tensionada com o auxílio de uma alavanca.

4.2 – Descrição dos corpos de prova

Os corpos de prova, com dimensões 200 mm × 200 mm, foram cortados com serra de fita a partir de uma placa quadrada de dimensões 1000 mm × 1000 mm, 3,04 mm de espessura e massa de 4,720 kg. Esta placa, confeccionada e fornecida pela EMBRAER, 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}.

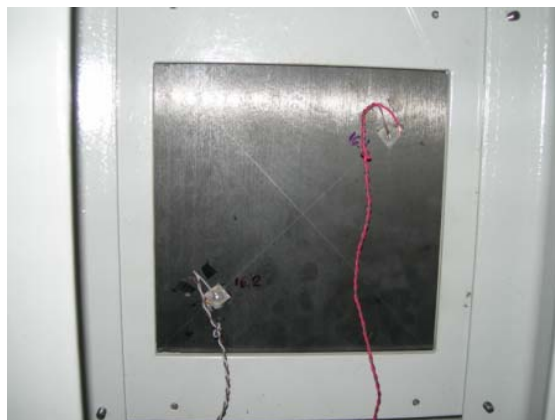
Nos corpos de prova foram coladas quatro pastilhas piezelétricas (duas em cada face) com dimensões 10 mm×10 mm e 0,127 mm de espessura, sobre uma circunferência de 65 mm de raio, centrada no ponto central da placa no qual ocorre o impacto (Figura 4.4).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 – 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.

4.3 – 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 4.2, com base em normas internas utilizadas pela EMBRAER.

Tabela 4.2 – 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 Martetele Pneumático	2,5	1	25	x	
Máquina de Polimento	14	1	137	x	
Caixa de Ferramentas	14	1	137		x

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

Na realização da campanha experimental, desenvolvida com um número total de 18 corpos de prova, identificados sucessivamente por números 1 a 18, os seguintes fatores são considerados:

- * Valor da energia de impacto;
- * Impactos simples ou múltiplos;
- * Diâmetro da ponteira de impacto.

A Tabela 4.3 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, de acordo com procedimento apresentado no Anexo A.

Tabela 4.3 - Valores de energia utilizados nos ensaios de impacto.

	Diâmetro da Ponteira: 12,5 mm		Diâmetro da Ponteira: 25,4 mm	
	Número da Placa	Energia (J)	Número 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 mostrado na Figura 4.5. 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 freqüenciais amostrados = 401. São utilizadas três bandas de freqüência, indicadas na Tabela 4.4.

Para os ensaios com impactos únicos, foram realizadas 20 medições dos sinais de impedância para cada faixa de freqüência em cada pastilha piezelétrica, sendo realizadas 10 antes e 10 após o impacto nos corpos de prova. E para os ensaios múltiplos realizou-se o mesmo procedimento dos ensaios com impactos únicos.

Tabela 4.4 - Bandas de freqüência utilizadas no experimento.

Bandas de Freqüência (KHz)
20 - 30
35 - 45
60 - 80



Figura 4.5 - Analisador de Impedância HP 4194A e sistema de fixação dos corpos de prova.

As funções de impedância eletromecânica foram processadas visando extração de características relacionadas com a presença e severidade dos danos causados pelos impactos, conforme procedimento detalhado no capítulo a seguir.

CAPÍTULO V

MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE PLACAS CONSTITUÍDAS DE MATERIAIS COMPOSTOS PELO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados de aplicação do método da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural na detecção e avaliação de danos provocados por impactos simples e múltiplos em corpos de prova de material composto, conforme o procedimento detalhado no Capítulo IV. Após avaliação da capacidade de detecção de dano em cada corpo de prova utilizado, foi ajustado um metamodelo visando correlacionar as métricas do dano com as energias de impacto.

5.1 Ensaio dos corpos de prova 1 e 10 ($E=4,61$ J)

Ao se impactar a Placa 1 com uma energia de 4,61J com uma meia esfera de 12,5 mm de diâmetro, verificou-se que não houve nenhuma falha visível, como mostrado na Figura 5.1. As funções de impedância da placa antes e após o impacto foram obtidas computando-se as médias de 10 aquisições. Foram utilizadas três faixas de frequências distintas, a saber: 20KHz a 30 kHz, 35KHz a 45 kHz e 60KHz a 80 kHz.

Para cada faixa de frequência, a métrica do dano foi computada de acordo com a Equação 3.5. 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*) e, em seguida, a partir de funções de impedância adquiridas antes e após o impacto (*baseline* × *dano*).

A comparação dos dois valores permite avaliar a participação de incertezas não relacionadas com o dano no cálculo da métrica. Espera-se que o primeiro valor seja muito inferior ao segundo para que, desta forma, possa-se garantir a preponderância da influência do dano no cálculo da métrica.

Os gráficos das partes reais das funções de impedância para as três faixas de frequência consideradas são mostrados nas Figuras 5.2(a), 5.2(c) e 5.2(e), ao passo que os diagramas de caixas da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.2(b), 5.2(d) e 5.2(f). Conforme discutido acima, são apresentados nestas últimas figuras os diagramas de caixa para os dois valores da métrica calculados para cada teste (*baseline* × *baseline*, indicada por “baseline” e *baseline* × *com dano*, indicada por “impacto”),

Os diagramas de caixa são representações gráficas que descrevem simultaneamente várias características importantes de um conjunto de dados, tais como centro (média), dispersão (desvio padrão), simetria e identificação das observações que estão longe do seio dos dados (essas observações são chamadas *outliers*). Informações complementares podem ser encontradas no Anexo B.

Comparando as curvas de impedância antes e após o impacto, 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.

Ao se analisar os resultados do diagrama de caixa da placa 1, verificou-se que nas três faixas de frequência utilizadas, os valores das métricas foram similares.

Com o mesmo procedimento empregado para a placa 1, a placa 10 foi impactada com a ponteira de diâmetro 25,4 mm de diâmetro e energia de 4,61 J. Na Figura 5.3 pode-se notar que não houve falhas aparentes. No entanto observando os gráficos da parte real das funções de impedância para as três faixas de frequência consideradas, mostrados nas Figuras 5.4(a), 5.4(c) e 5.4(e), e os diagramas de caixas da métrica de dano mostrados nas Figuras 5.4(b), 5.4(d) e 5.4(f), constata-se que houve modificações nos sinais de impedância antes e após o impacto, assim como nos valores da métrica. Como isso, pode-se dizer que o método foi capaz de detectar o impacto de energia 4,61 J.

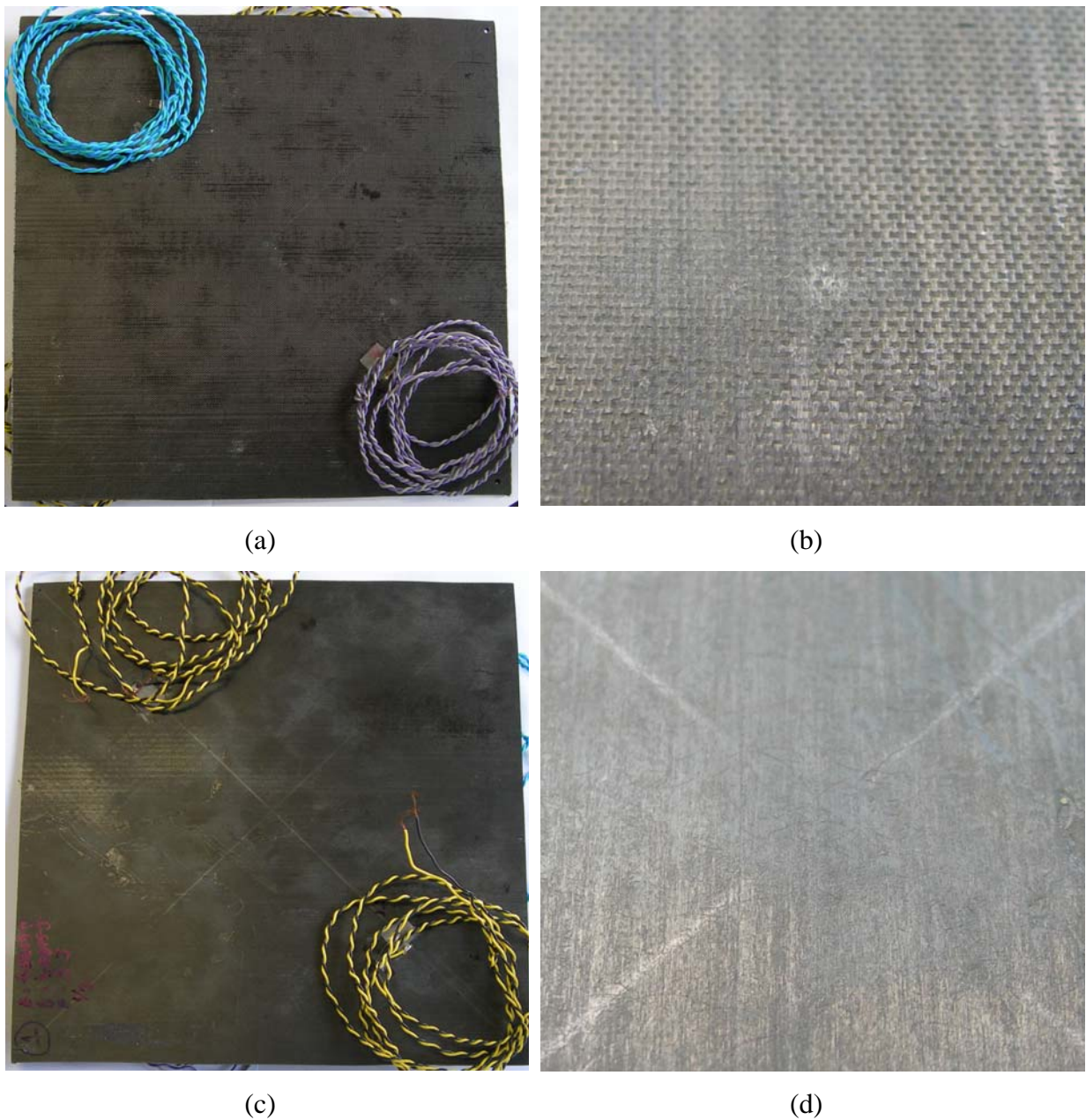
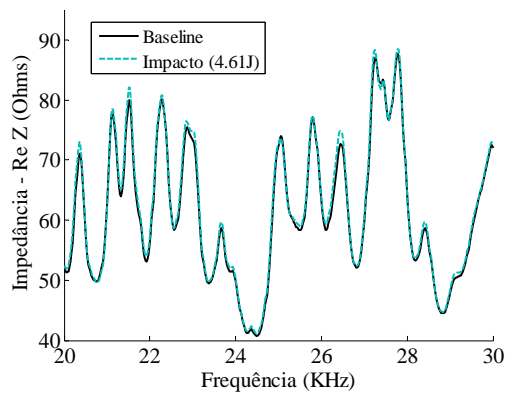
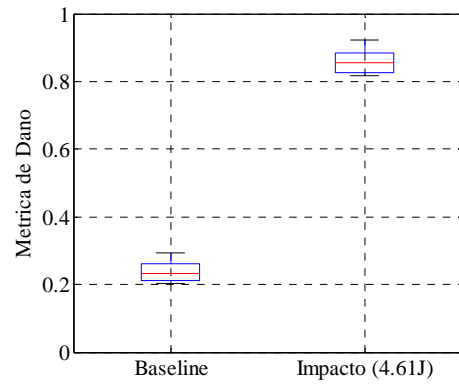


Figura 5.1 - Placa 1: impacto com uma energia de 4,61J com uma ponteira de 12,54 mm. (a) vista da face impactada; (b) ampliação do local do impacto na face impactada; (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior.

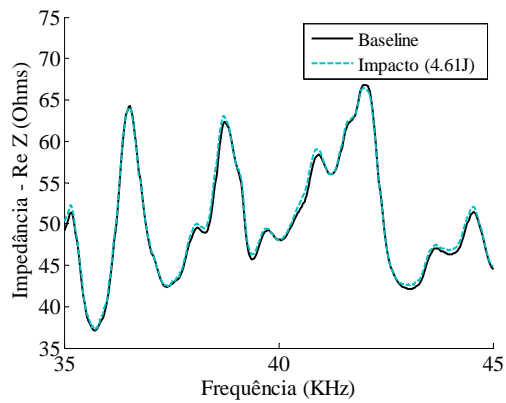
Fazendo-se uma análise das curvas de impedância e dos diagramas de caixa mostrados na Figura 5.2 observa-se que a forma das curvas variam significativamente em relação às da placa 1, o que pode ser justificado pelas diferenças geométricas e físicas existentes entre as duas placas e pelas possíveis diferenças das condições de contorno, determinadas principalmente pela pressão aplicada aos corpos de prova durante sua fixação nas molduras.



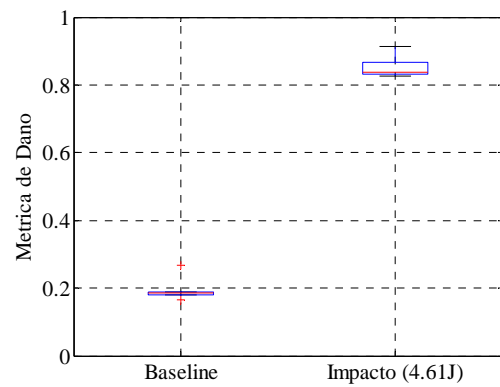
(a)



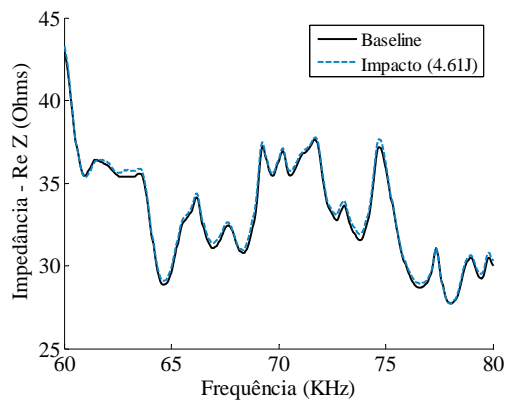
(b)



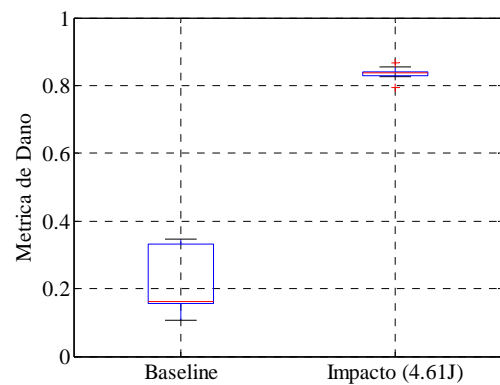
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.2 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a Placa 1, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e energia de 4,61.

Entretanto, 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 12,54 mm produz uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm.

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 20 KHz a 30 KHz mostrou ter maior sensibilidade ao impacto, enquanto na faixa de 60 KHz a 80 KHz é menor a sensibilidade.

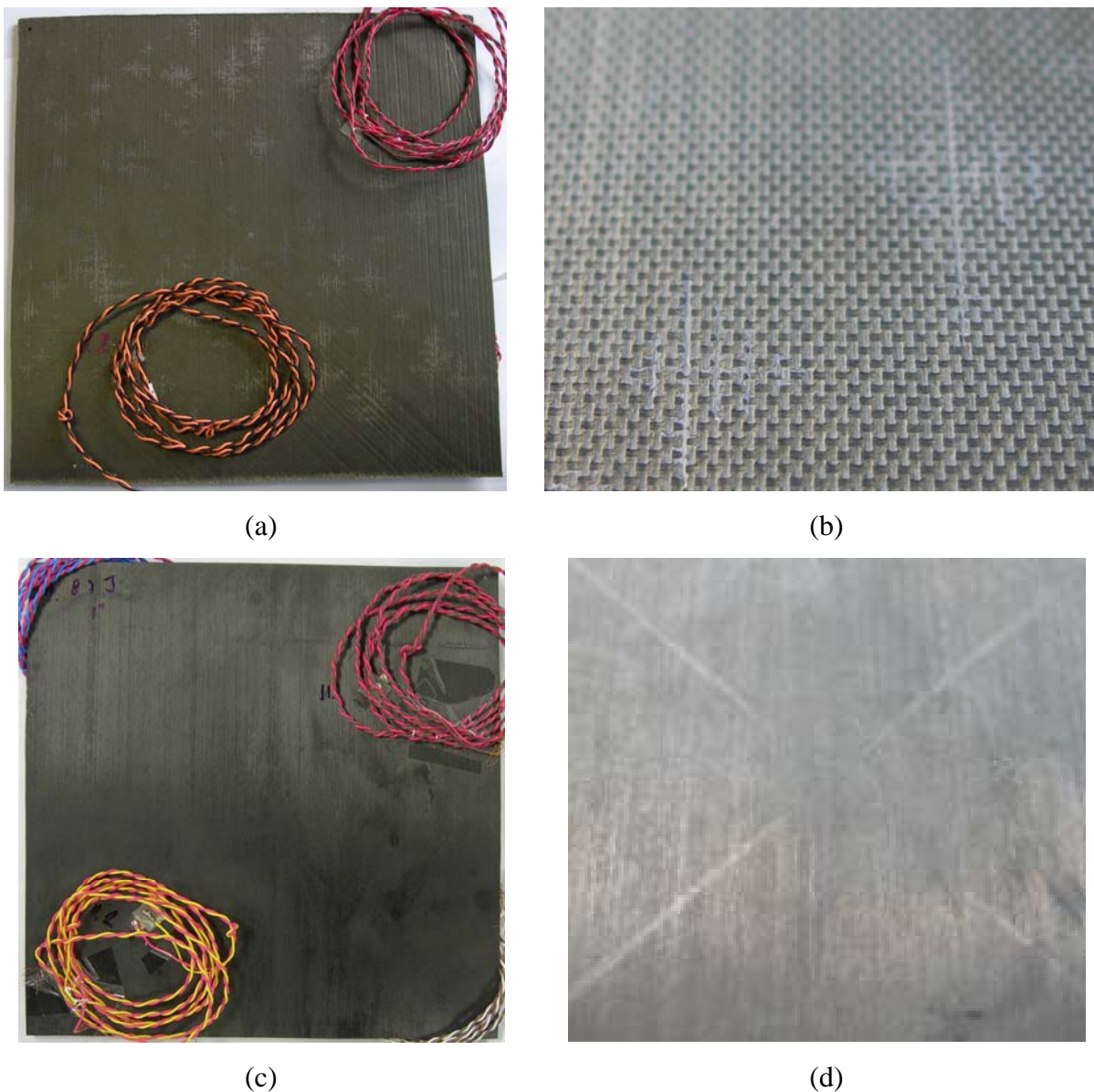
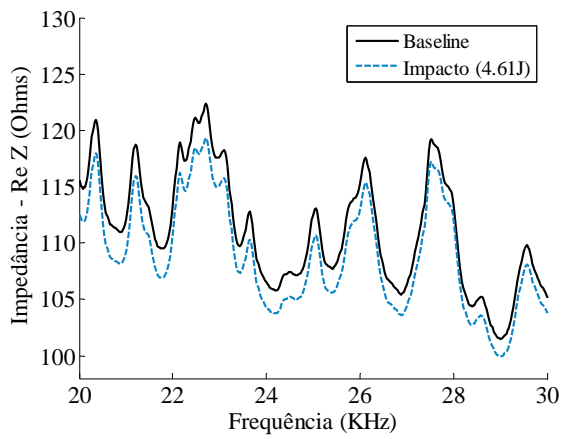
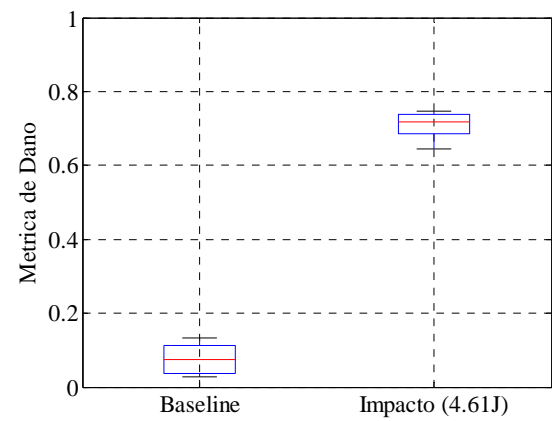


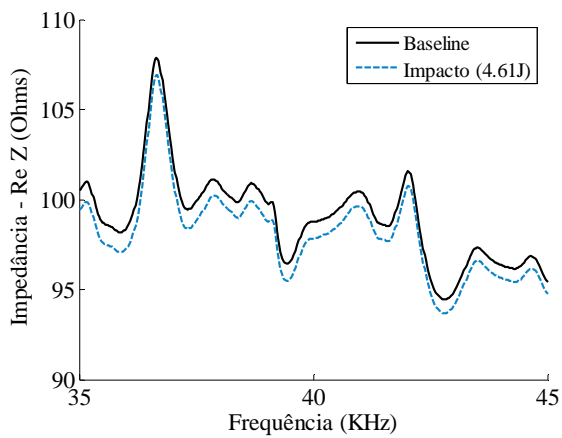
Figura 5.3 - Placa 10: impacto com uma energia de 4,61J com uma ponteira de 25,40 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior..



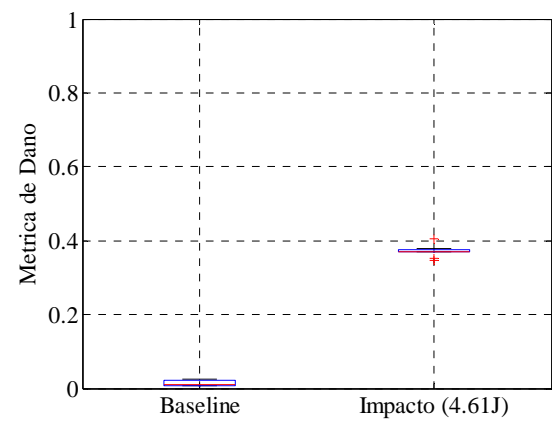
(a)



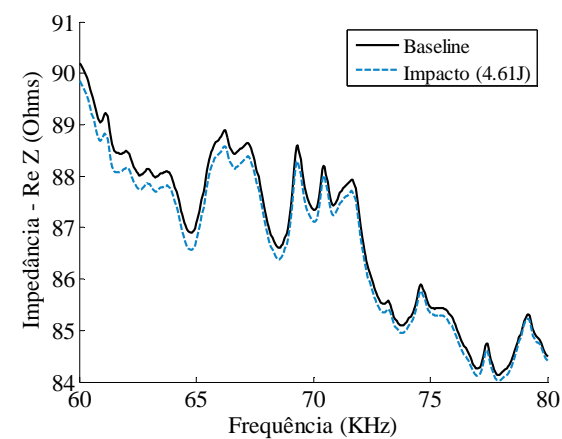
(b)



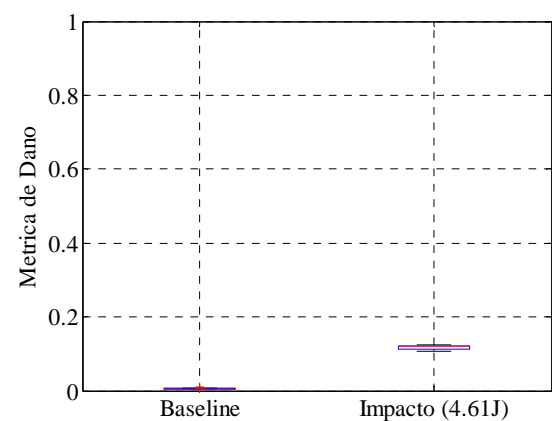
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.4 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 10, impactada com ponteira $\phi=25,4$ mm e energia $E=4,61$.

5.2 Ensaio dos Corpos de Prova 2 e 11 (E=8,78J)

Aplicou-se o mesmo procedimento anteriormente descrito às placas 2 e 11, as quais foram impactadas as ponteiros de 12,5 mm e 25,4 mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 8,78 J. Analisando os resultados obtidos, verificou-se, como mostram as Figuras 5.5 e 5.7, que não houve falhas aparentes para as duas placas. Todavia, observando os gráficos das partes reais das funções de impedância para as três faixas de frequência consideradas, mostrados nas Figuras 5.6(a), 5.6(c), 5.6(e), 5.8(a), 5.8(c) e 5.8(e), e os diagramas de caixas da métrica de dano mostrados nas Figuras 5.6(b), 5.6(d), 5.6(f), 5.8(b), 5.8(d) e 5.8(f), observa-se que houve pequenos deslocamentos dos picos nos eixos de abscissas e de ordenadas nos sinais de impedância antes e após o impacto, assim como nos valores da métrica. Como isso, pode-se dizer que o método foi capaz de detectar os danos causados por impacto de energia 8,78 J.

Ao se analisar os resultados do diagrama de caixa da placa 2 para as três faixas de frequência, verificou-se que os valores das métricas com dano foram próximos entre si, sendo que a faixa de 60 KHz a 80 KHz apresenta uma maior sensibilidade em relação ao danos provocados por impacto.

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 12,54 mm leva a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm.

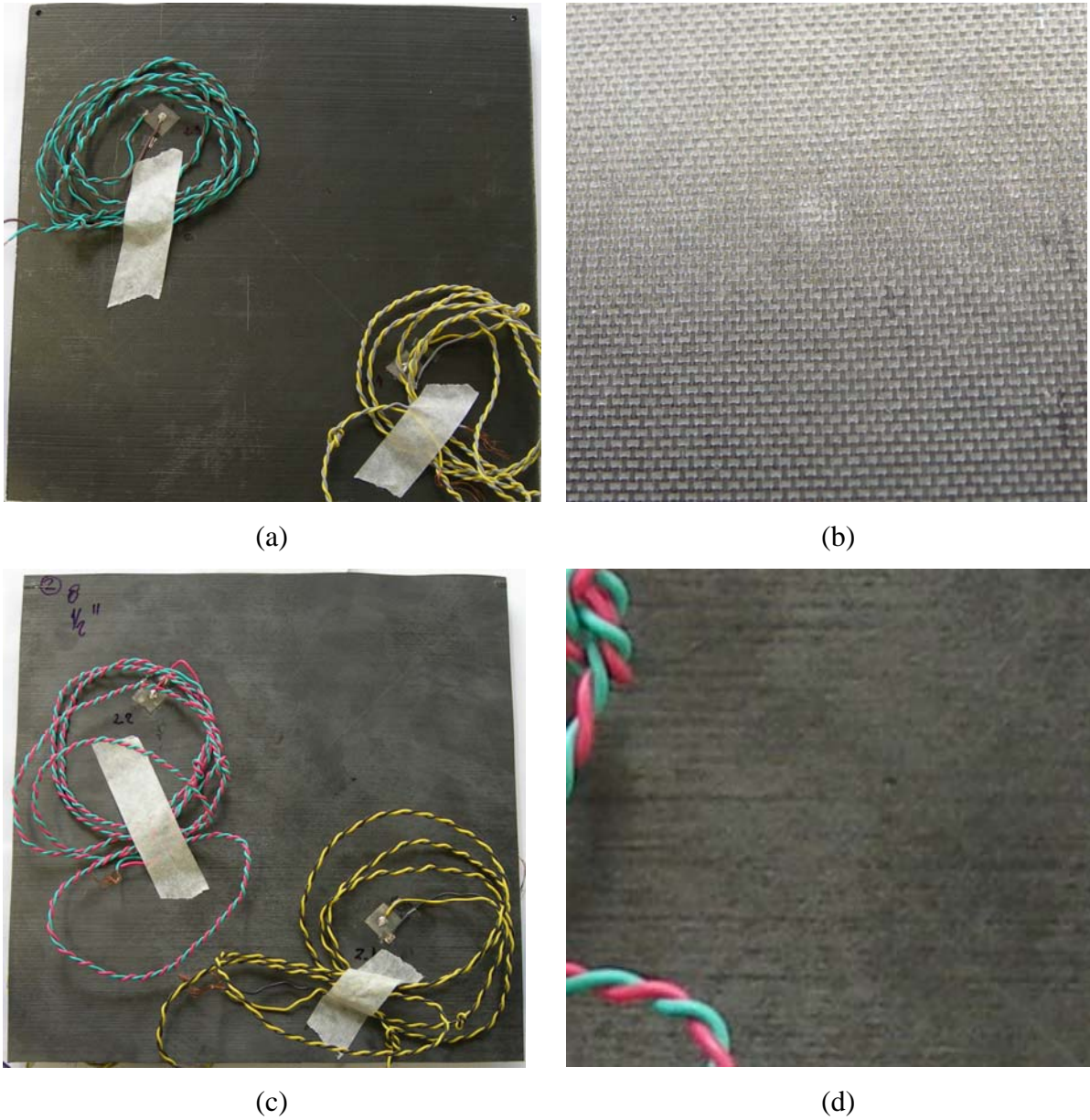
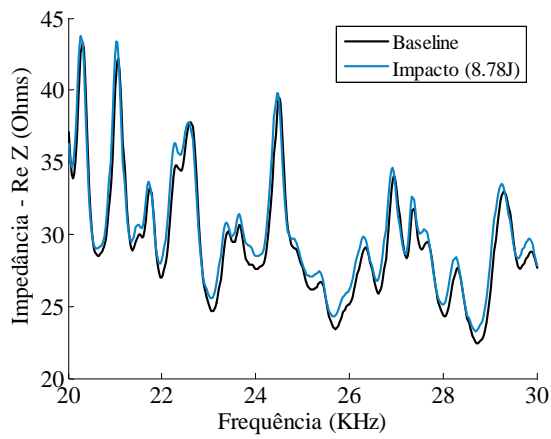
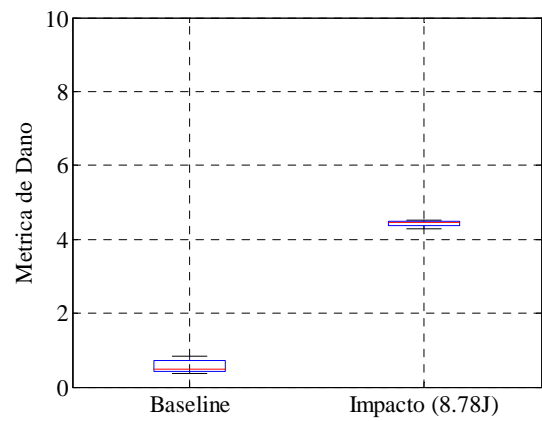


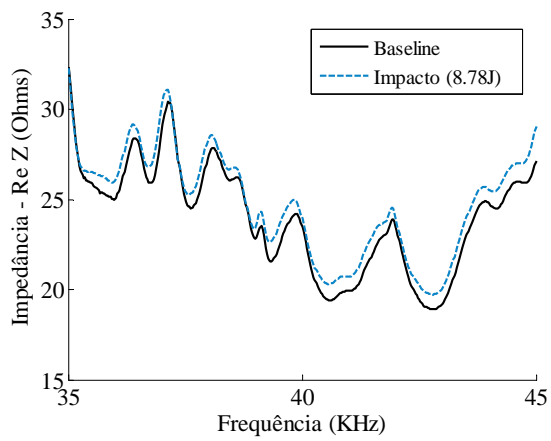
Figura 5.5 - Placa 2: impacto com uma energia de 8,78 J com uma ponteira de 12,54 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior..



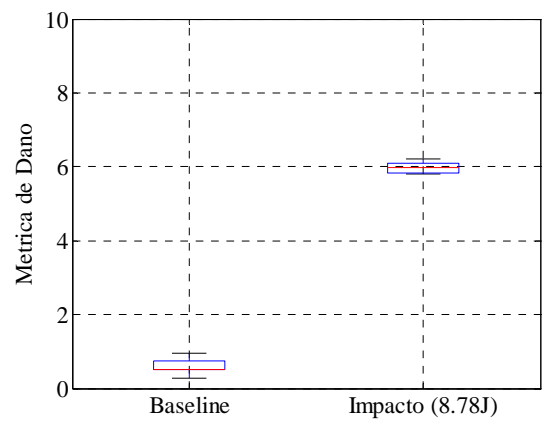
(a)



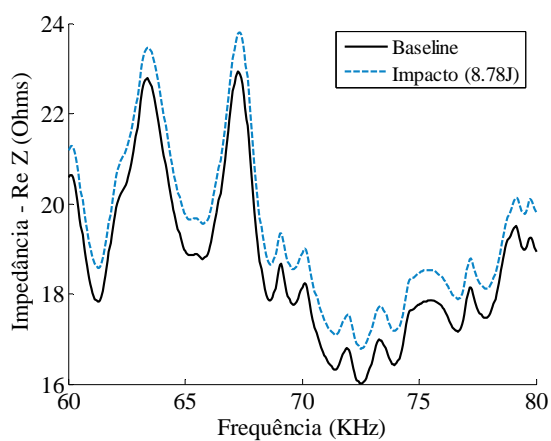
(b)



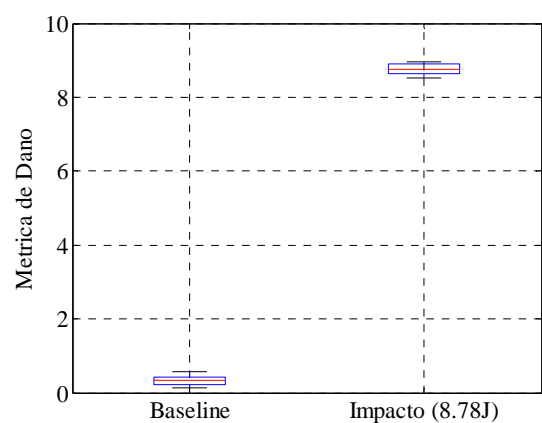
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.6 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 10, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e energia $E=8.78$ J.

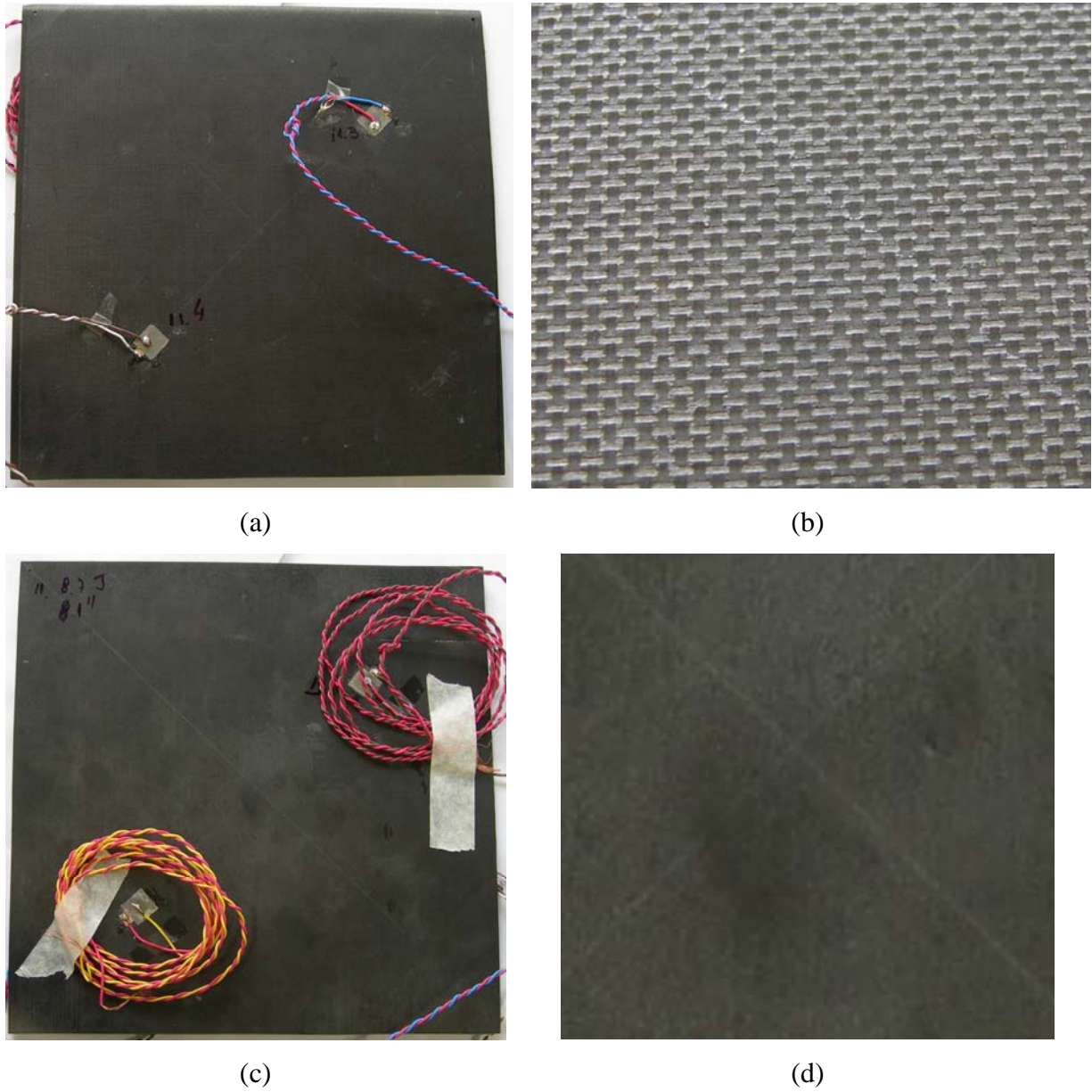
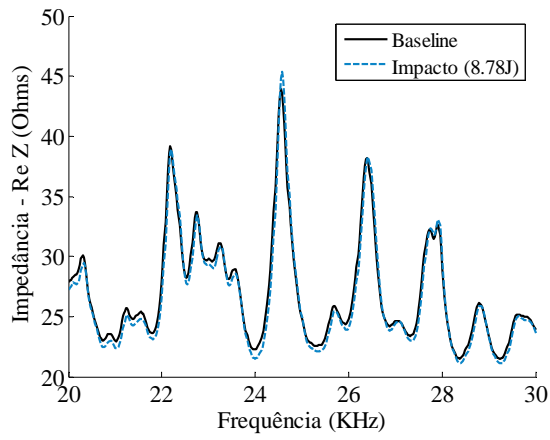
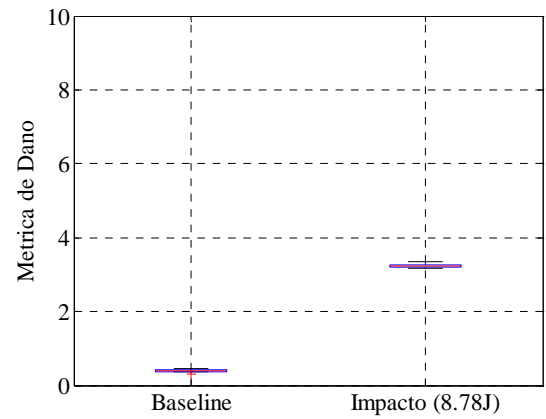


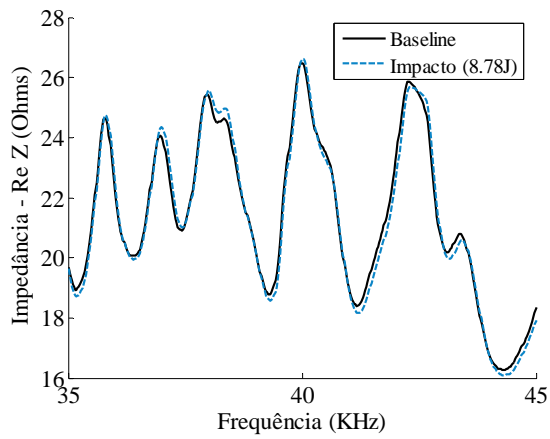
Figura 5.7 - Placa 11: impacto com uma energia de 8,78 J com uma ponteira de 25,40 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior..



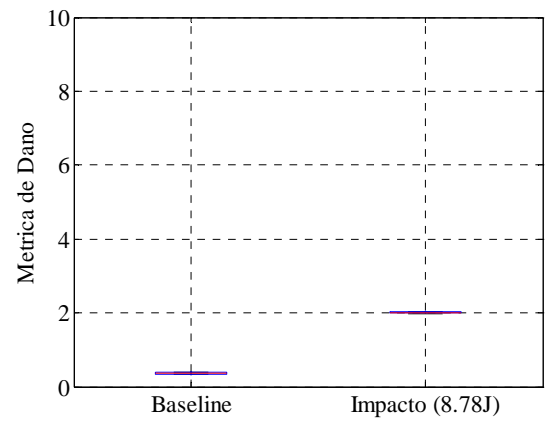
(a)



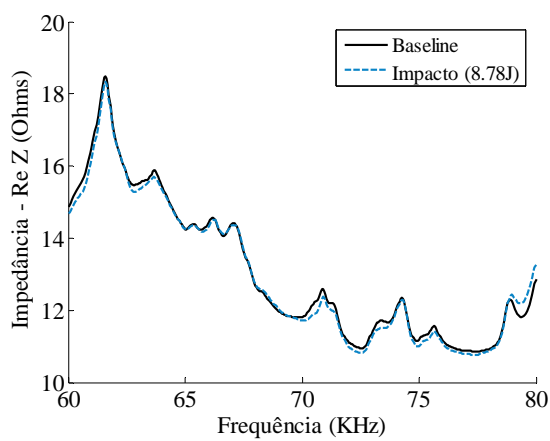
(b)



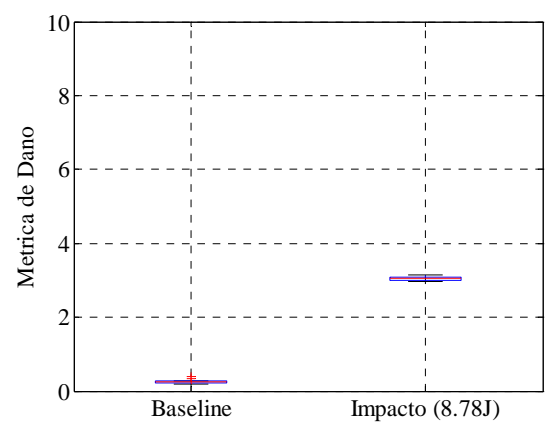
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.8 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 11, impactada com ponteira $\phi=25,40$ mm e energia $E=8,78$ J.

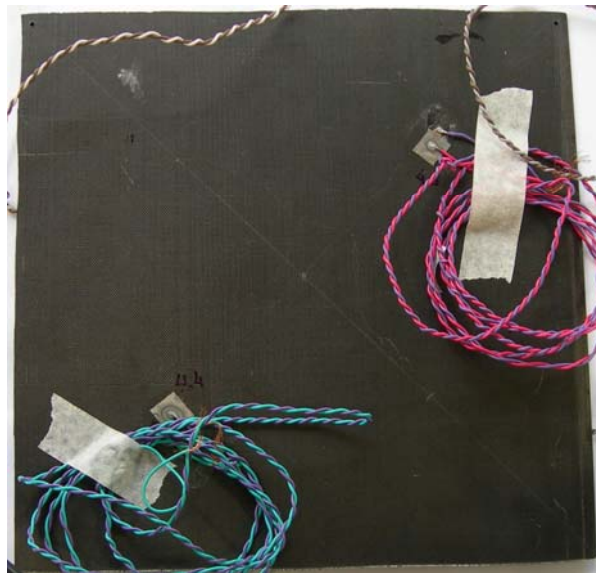
5.3 Ensaio dos corpos de prova 3 e 12 (E=15,0 J)

As placas 3 e 12 foram impactadas as ponteiros de 12.5 mm e 25.4 mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 15 J. Analisando os resultados obtidos, verificou-se o surgimento de trincas, como mostram as Figuras 5.9 (placa 3) e 5.11 (placa 12) sendo que na primeira foi perceptível uma maior severidade de dano. Observando os gráficos das partes reais das funções de impedância para as três faixas de frequência consideradas, mostrados nas Figuras 5.10(a), 5.10(c), 5.10(e), 5.12(a), 5.12(c) e 5.12(e), e os diagramas de caixas da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.10(b), 5.10(d), 5.10(f), 5.12(b), 5.12(d) e 5.12(f), nota-se que nos sinais de impedância antes e após o impacto sofreram grandes variações, assim como os valores da métrica de dano. Como isso, pode-se dizer que o método foi capaz de detectar a presença de danos causados por impacto de energia 15 J.

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 60 KHz a 80 KHz 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 30 KHz mostrou-se a menos sensível em relação ao dano e a faixa mais sensível foi a de 35KHz a 45KHz.

Fazendo uma comparação dos resultados obtidos para as placas 3 e 13, 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 12,54 mm leva a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm. No caso aqui examinado, este fato pode ser comprovado pelo número de trincas aparentes nas placas, que podem ser vistas nas Figs.5.9 e 5.11.



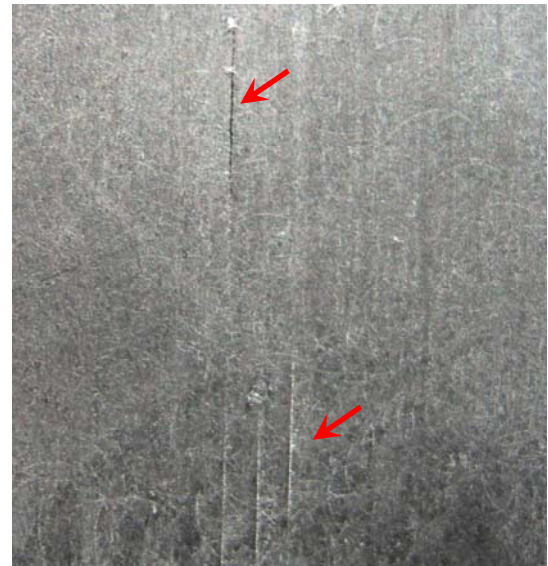
(a)



(b)

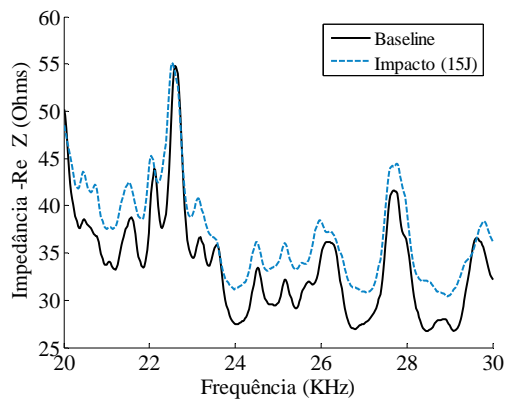


(c)

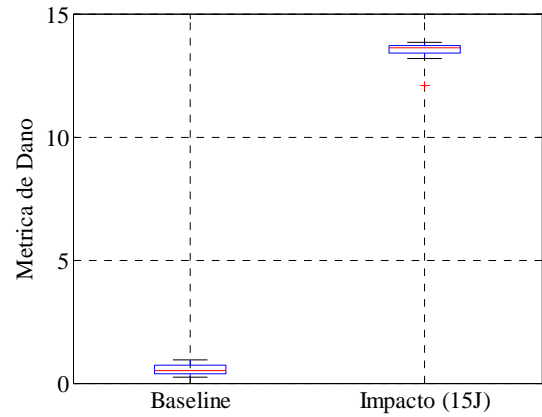


(d)

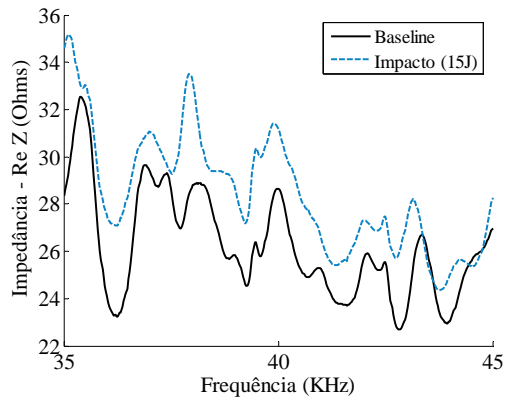
Figura 5.9 - Placa 13: impacto com uma energia de 15 J com uma ponteira de 12,54 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior..



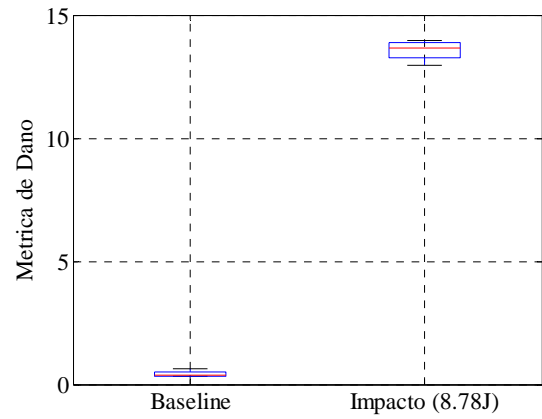
(a)



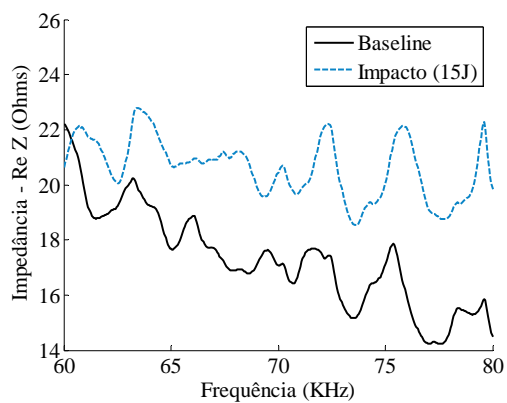
(b)



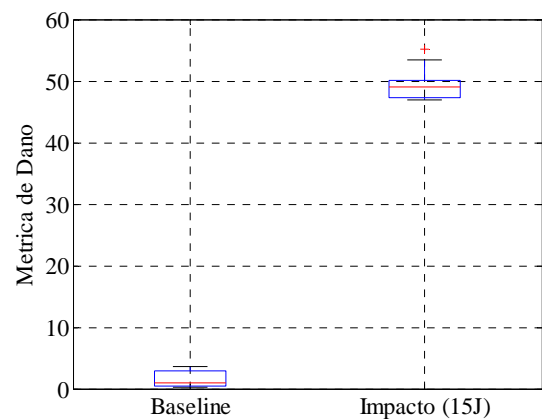
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.10 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 3, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e energia $E=15$ J.

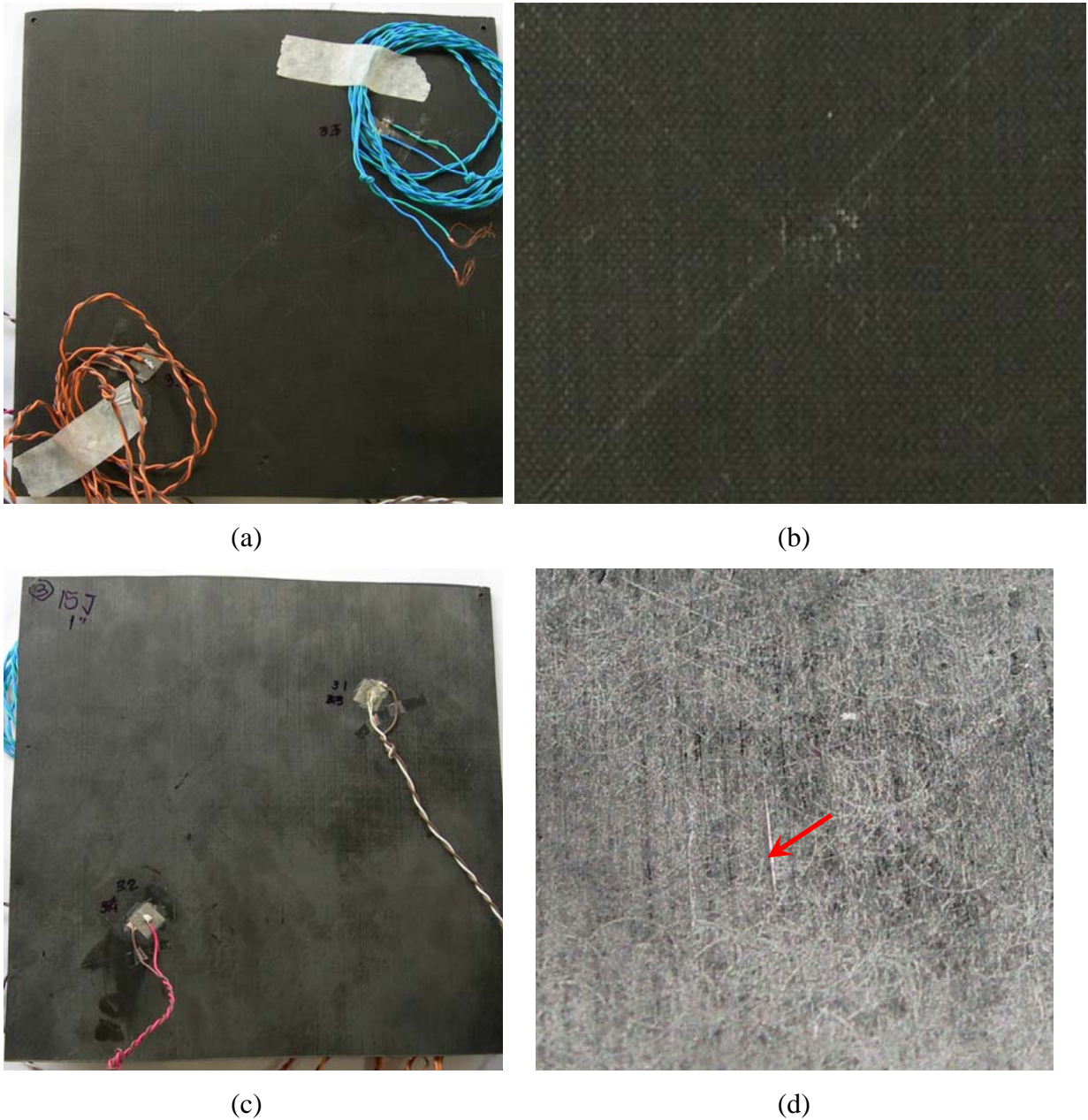
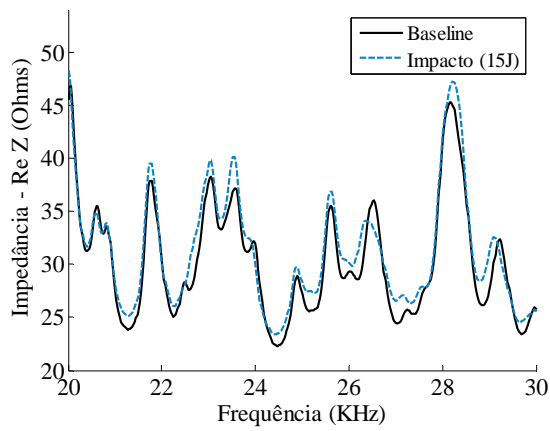
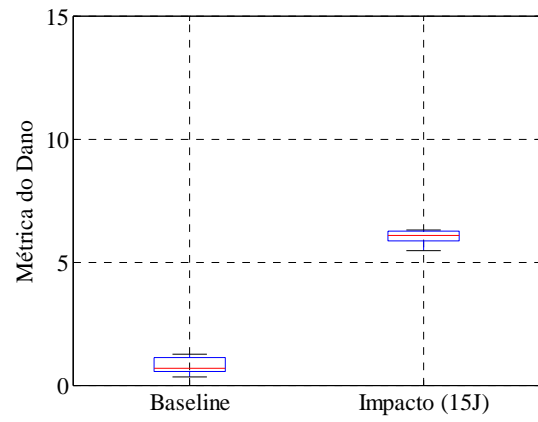


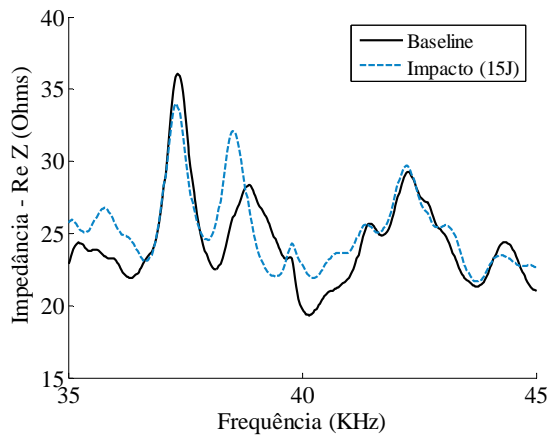
Figura 5.11 - Placa 13: impacto com uma energia de 15 J com uma ponteira de 25,40 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior.



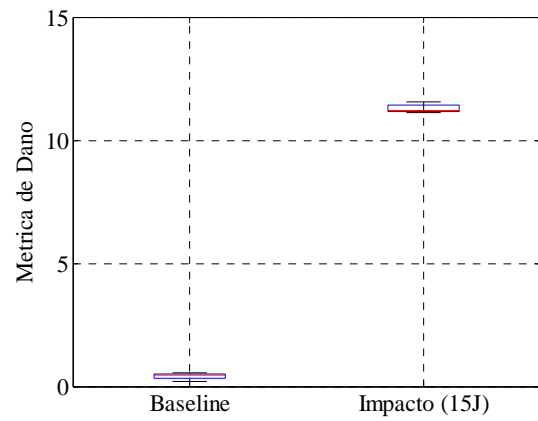
(a)



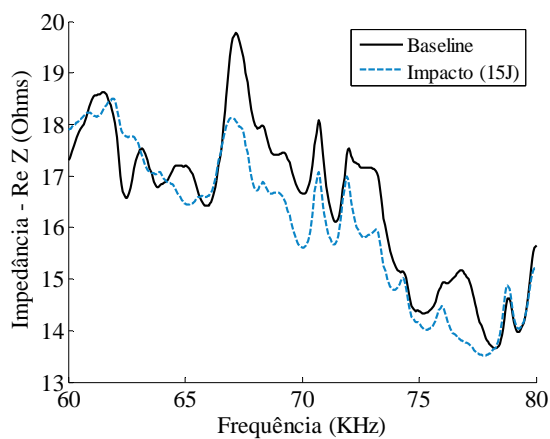
(b)



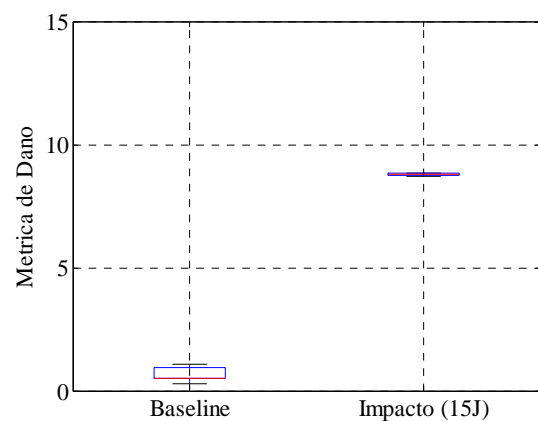
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.12 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 12, impactada com ponteira $\phi=25,40$ mm e energia $E=15$ J.

5.4 Ensaio dos corpos de prova 4 e 13 (E=20,0 J)

As placas 4 e 13 foram impactadas com as ponteiros de 12.5 mm e 25.4 mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 20 J. Analisando os resultados obtidos, verificou-se nas Fig. 5.13 (placa 4) o surgimento de trincas e delaminações e na Fig.5.15 (placa 13) verificaram-se pequenas trincas superficiais. Ambas as placas apresentaram um pequeno esmagamento na área impactada. Observando os gráficos das partes reais das funções de impedância para as três faixas de frequência consideradas (Figuras 5.14(a), 5.14(c), 5.14(e), 5.16(a), 5.16(c) e 5.16(e)), e os diagramas de caixas da métrica de dano (Figuras 5.14(b), 5.14(d), 5.14(f), 5.16(b), 5.16(d) e 5.16(f)), 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 80 KHz), 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 35 KHz a 45 KHz), enquanto, para a faixa 60 KHz a 80 KHz, 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 12,54 mm leva a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm. No entanto este fato não se confirma para as medições efetuadas na faixa de frequência de 60 KHz a 80 KHz.

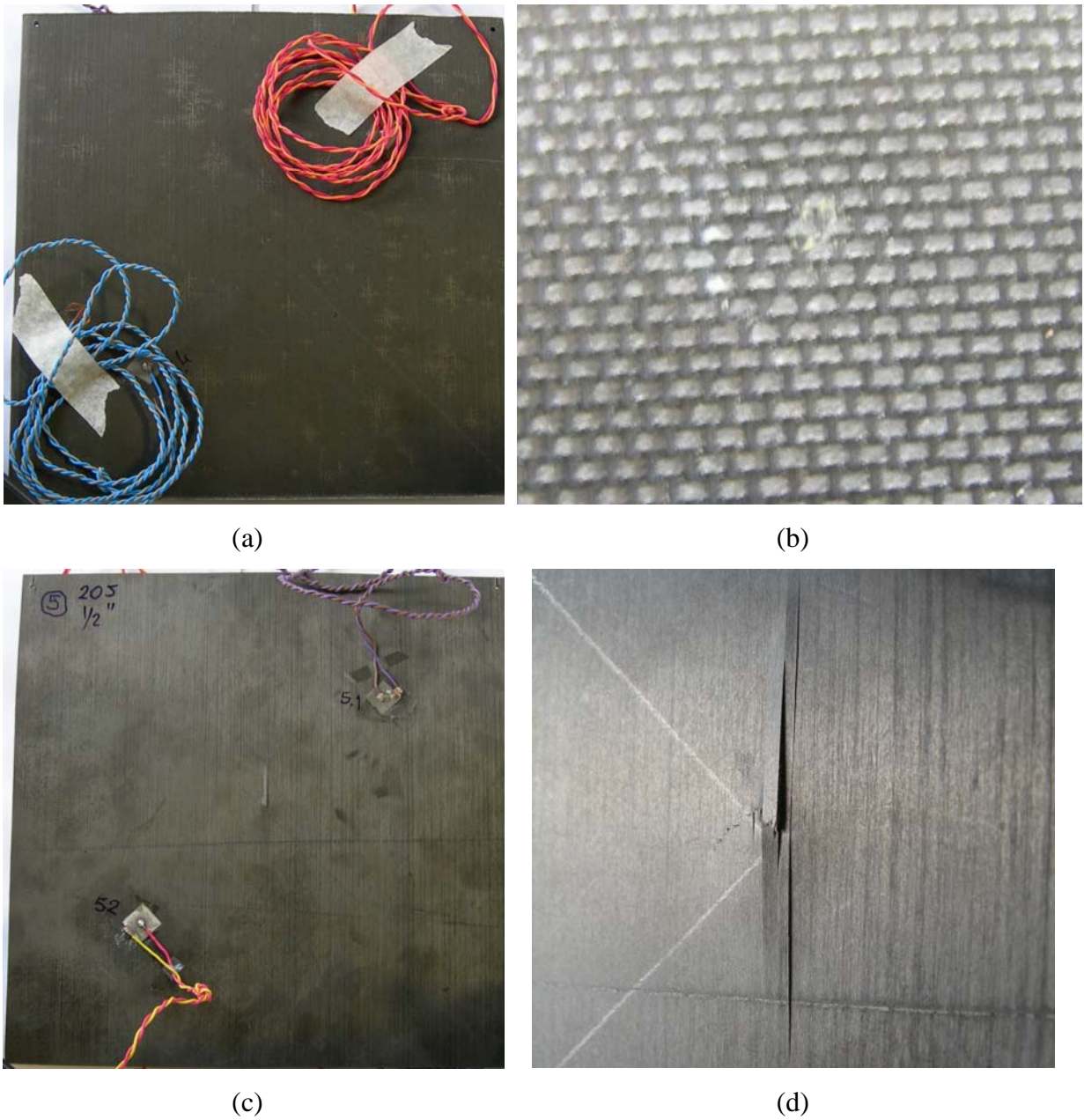
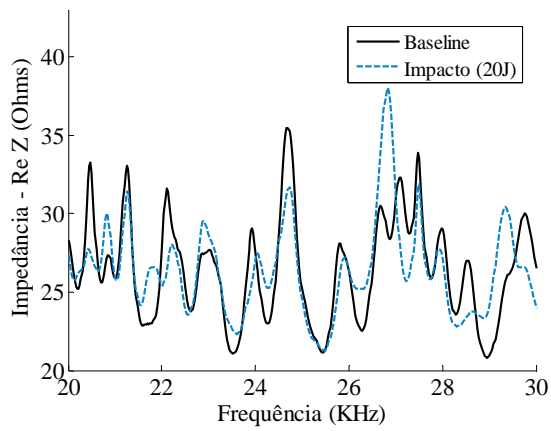
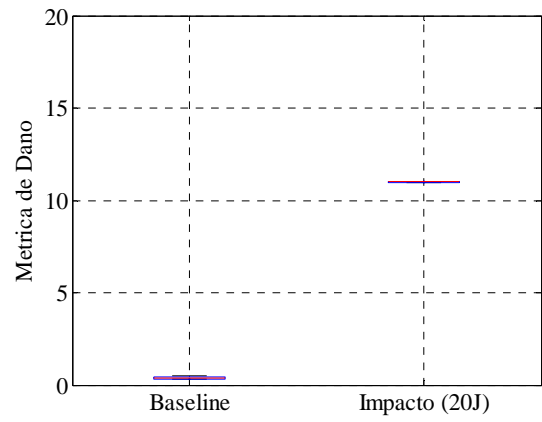


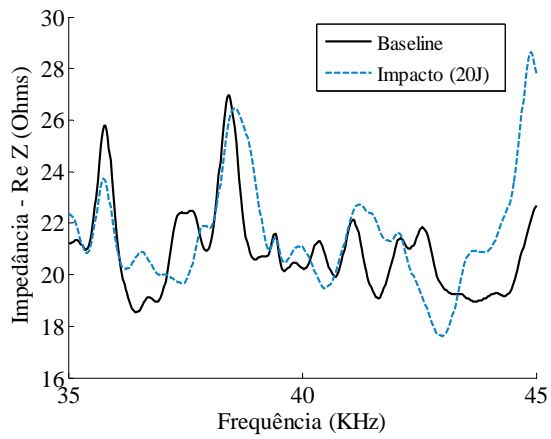
Figura 5.13 - Placa 4: impacto com uma energia de 20 J com uma ponteira de 12,54 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior..



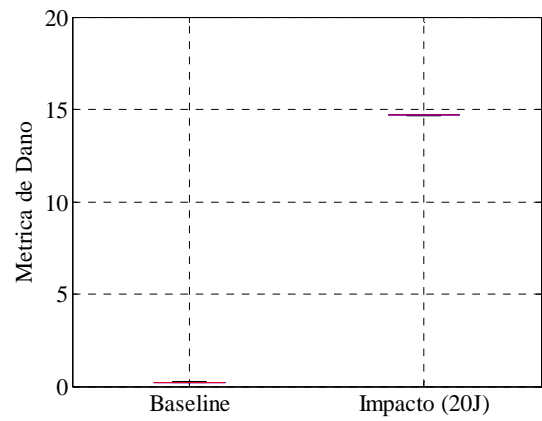
(a)



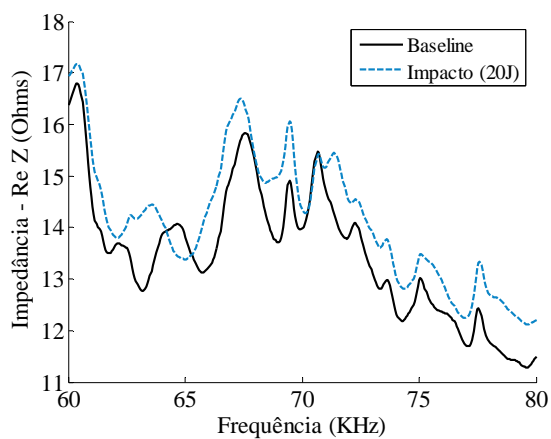
(b)



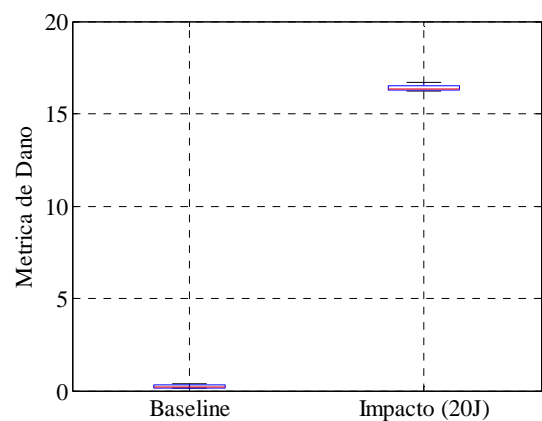
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.14 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 4, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e energia $E=20$ J.

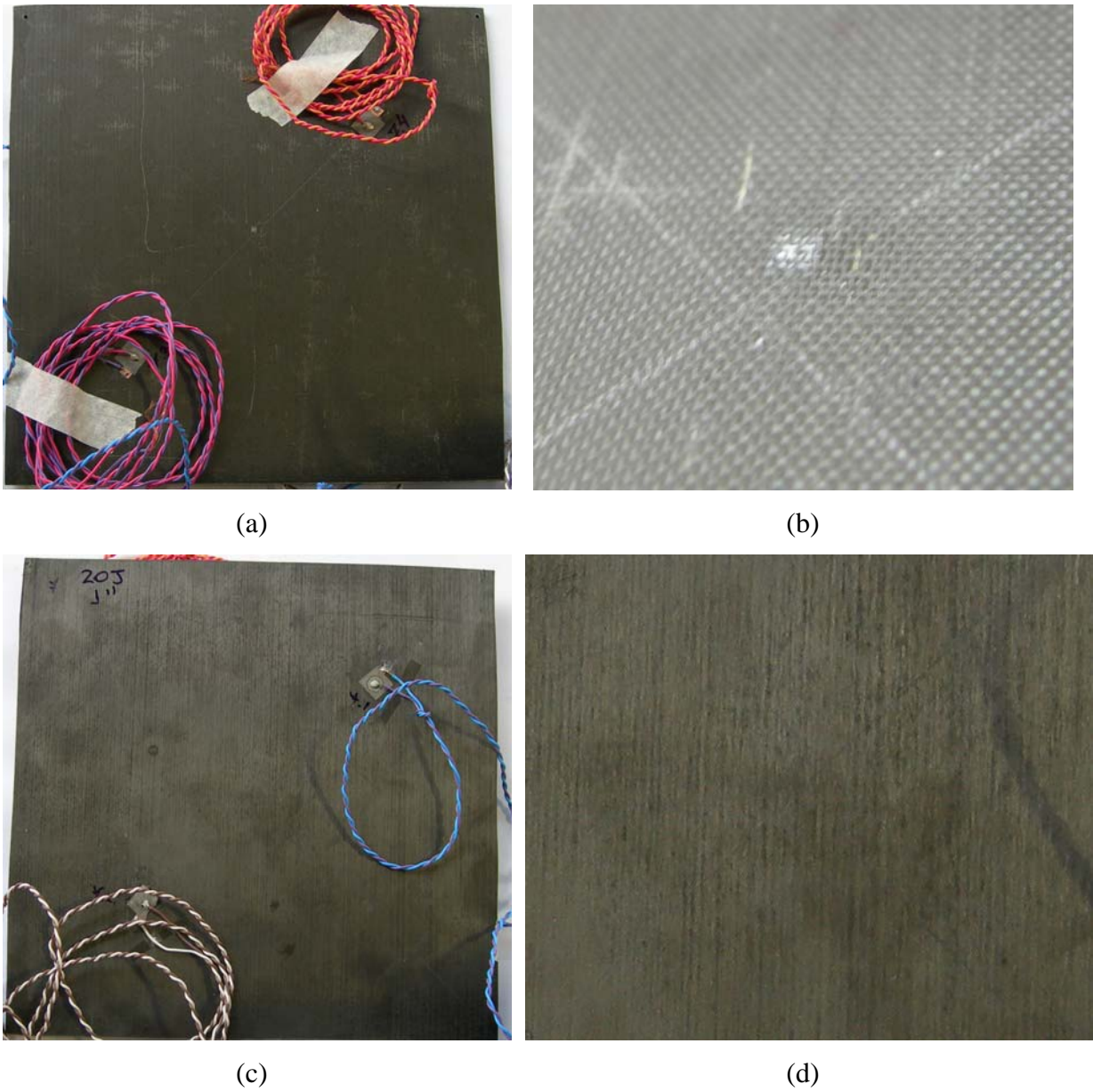
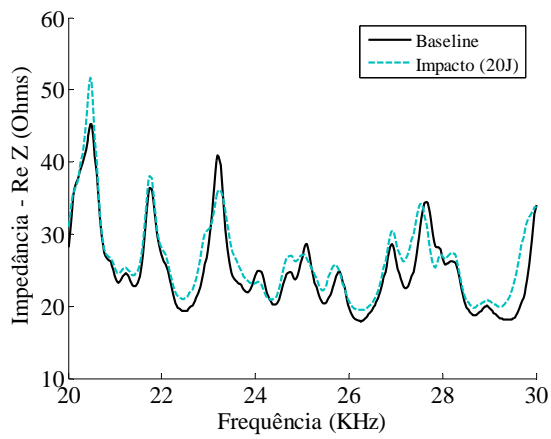
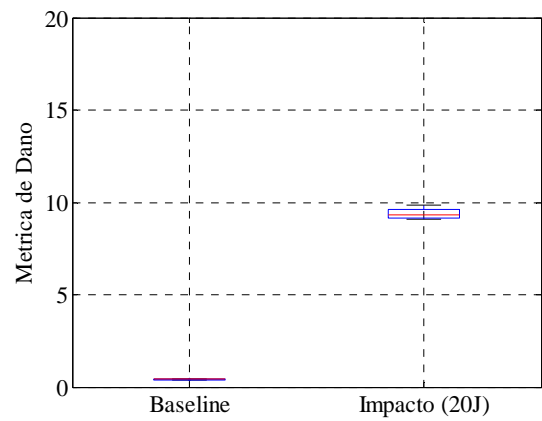


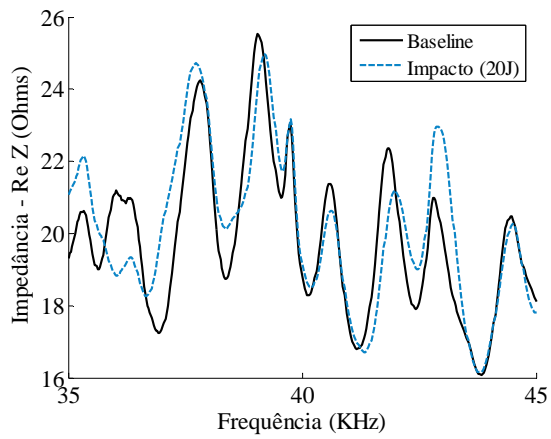
Figura 5.15 - Placa 13: impacto com uma energia de 20 J com uma ponteira de 25,40 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior.



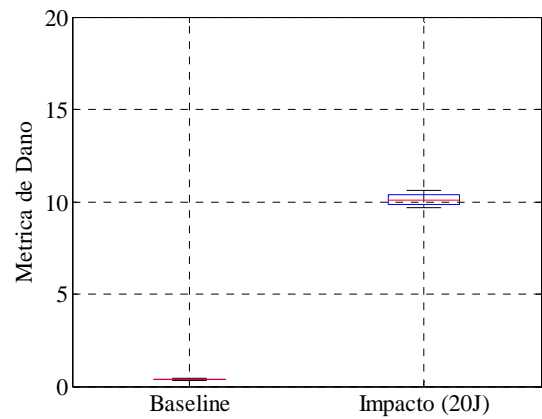
(a)



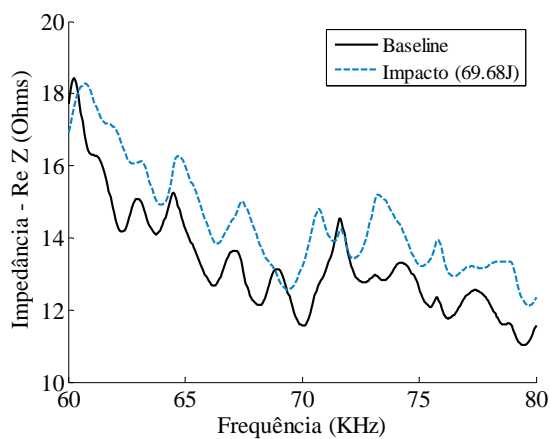
(b)



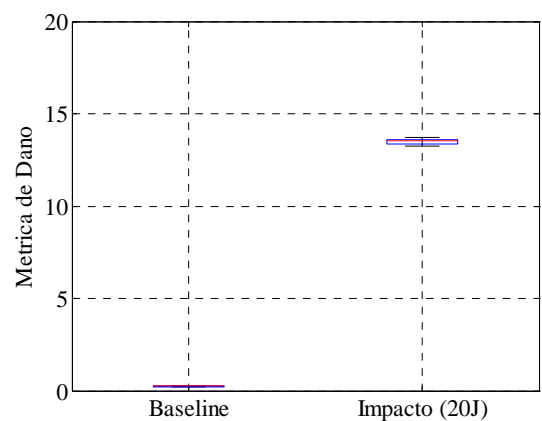
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.16 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 13, impactada com ponteira $\phi=25,40$ mm e energia $E=20$ J.

5.5 Ensaio dos corpos de prova 5 e 14 (E=69,68 J)

O procedimento foi repetido para as placas 5 e 14, que foram impactadas com ponteiros de 12,5 mm e 25,4 mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 69,68 J. A partir dos resultados obtidos, verificaram-se nas Fig. 5.17 (placa 5) e Fig.5.19 (placa 14) danos visíveis tanto da face impactada quanto na face posterior. Foram provocados furos no ponto de impacto das placas 5 e 14, com diâmetros de aproximadamente 15 mm e 22 mm, respectivamente. Nas faces posteriores das placas são visíveis as delaminações, rupturas de fibra e trincas. Observando os gráficos das partes reais das funções de impedância para as três faixas de frequência consideradas, mostrados nas Figuras 5.18(a), 5.18(c), 5.18(e), 5.20 (a), 5.20(c) e 5.20(e), ao passo que os diagramas de caixa da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.18(b), 5.18(d), 5.18(f), 5.20(b), 5.20(d) e 5.20 (f). 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 20 KHz a 30KHz mostrou-se a menos sensível aos danos provocados por impacto e a faixa de frequência de 60 KHz a 80 KHz 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 35 KHz a 45 KHz foi menos sensível aos danos provocados por impacto e a faixa de frequência de 60 KHz a 80 KHz 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 12,54 mm é bem menor que a área do dano causado pela com a ponteira de 25,40 mm.

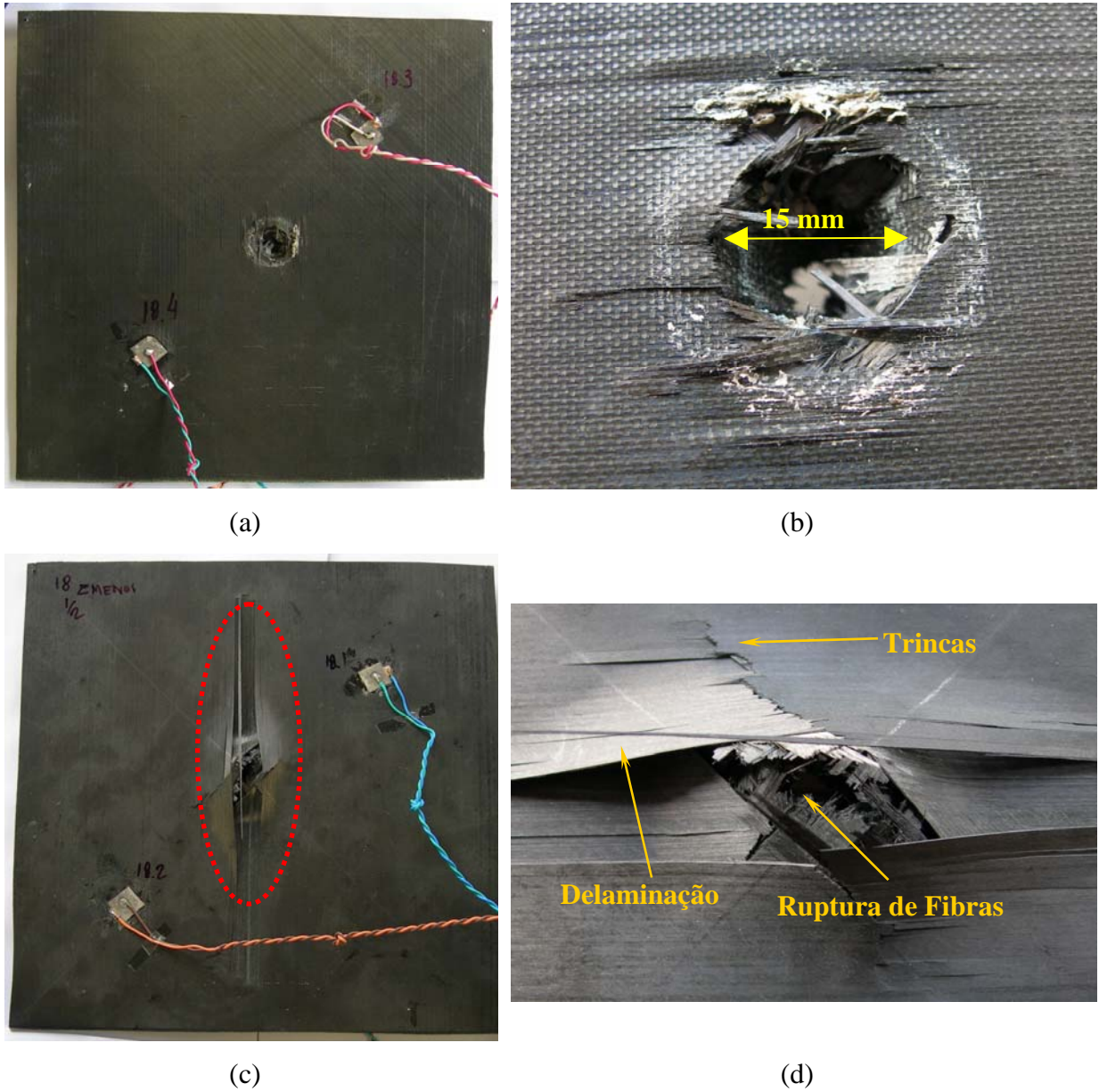
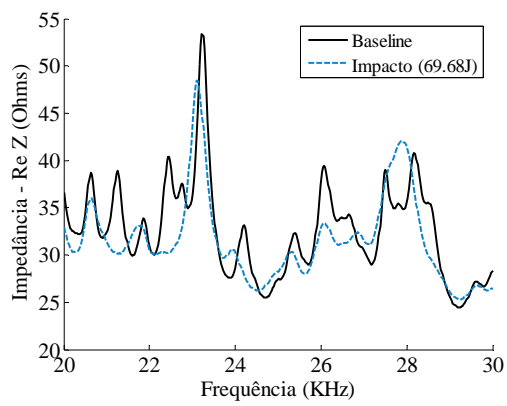
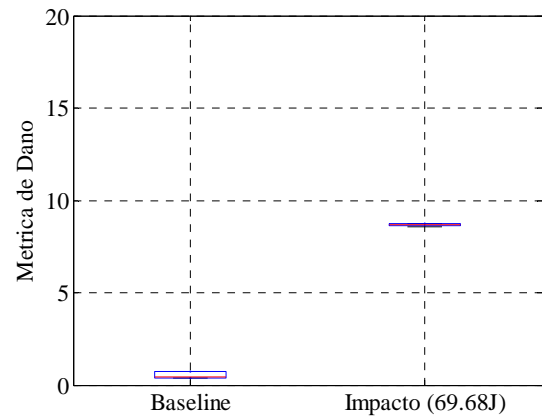


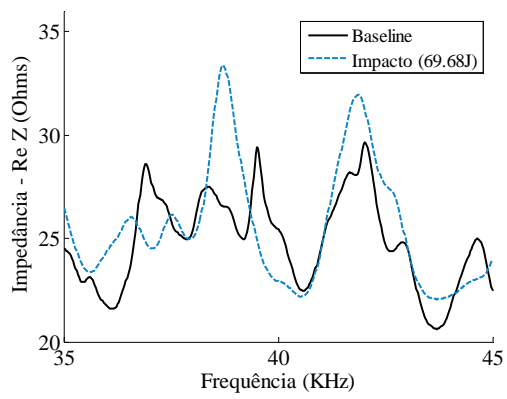
Figura 5.17 - Placa 5: impacto com uma energia de 20 J com uma ponteira de 12,5 mm: (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior.



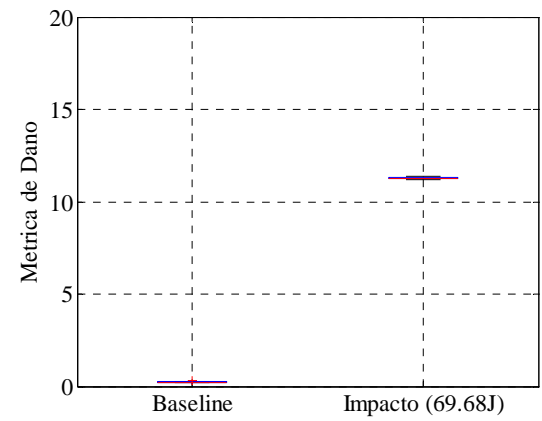
(a)



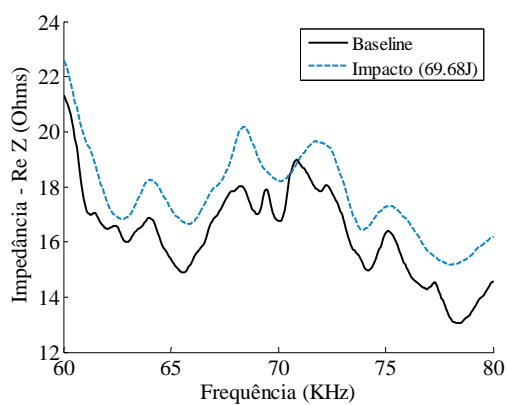
(b)



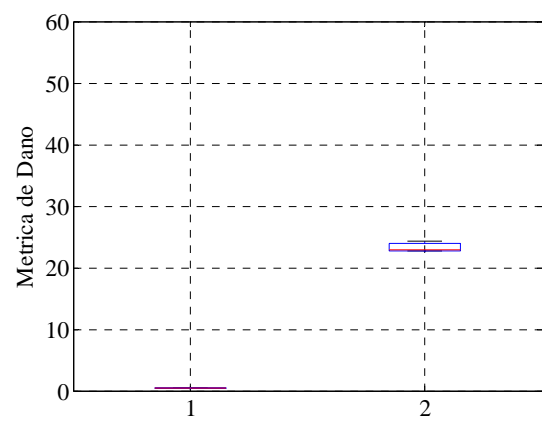
(c)



(d)

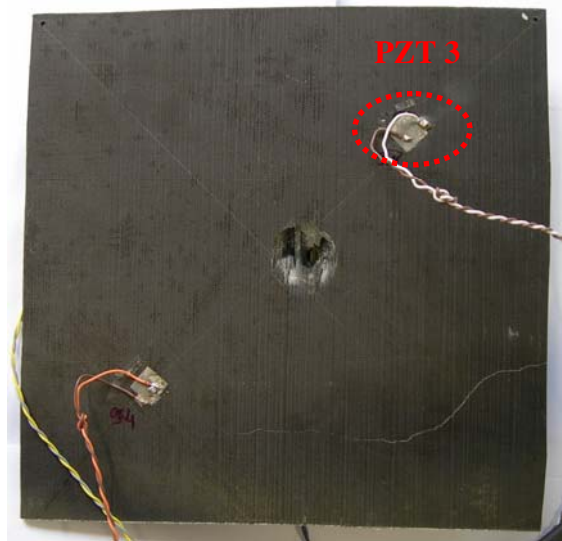


(e)

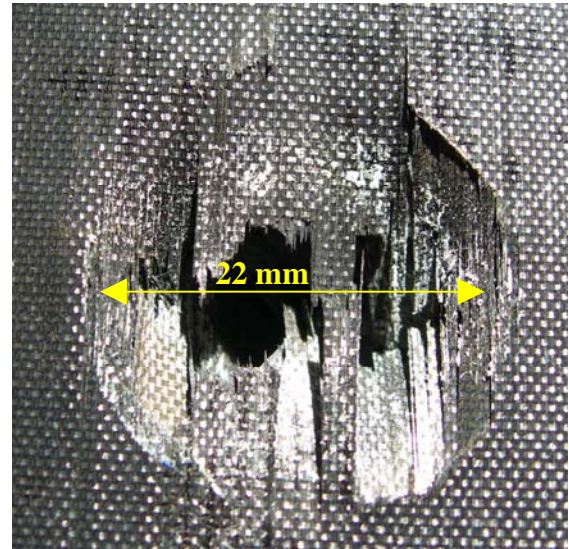


(f)

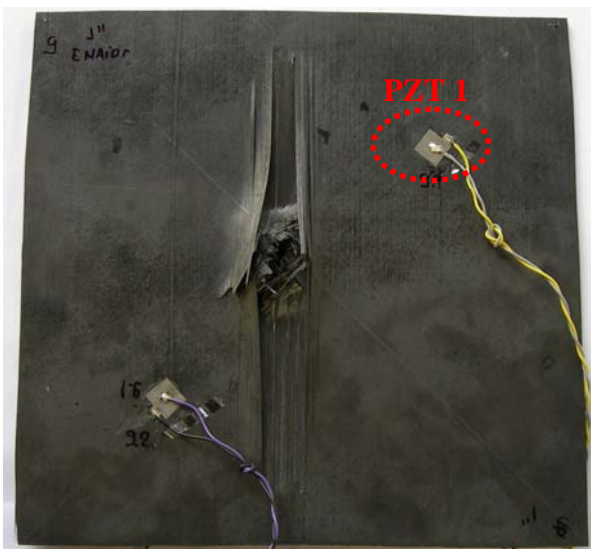
Figura 5.18 - Partes reais da função de impedância e valores da métrica de dano para a placa 5, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e energia $E=69,68$ J.



(a)



(b)

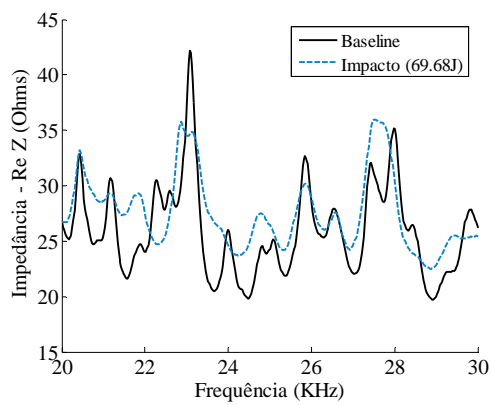


(c)

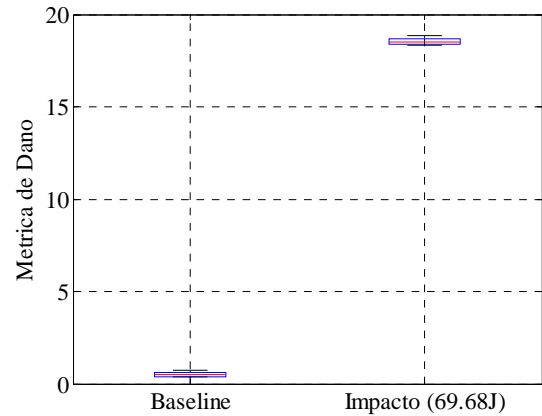


(d)

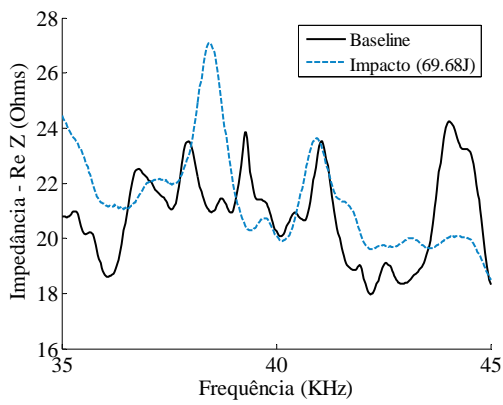
Figura 5.19 - Placa 14: impacto com uma energia de 20 J com uma ponteira de 22,4 mm. (a) vista da face impactada, (b) ampliação do local do impacto na face impactada, (c) vista da face posterior, (d) ampliação do local do impacto na face posterior.



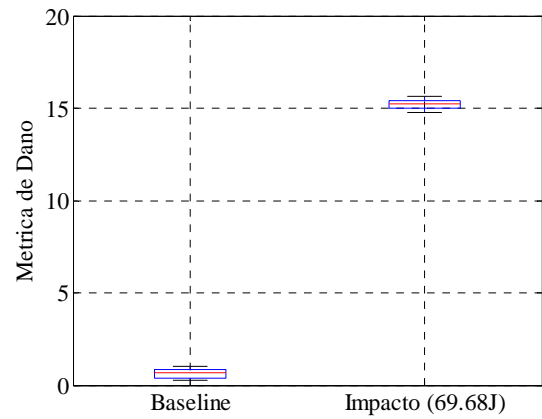
(a)



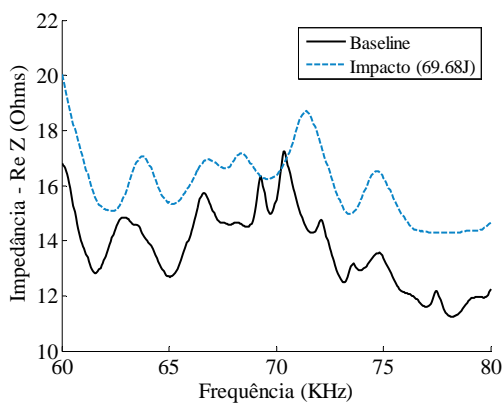
(b)



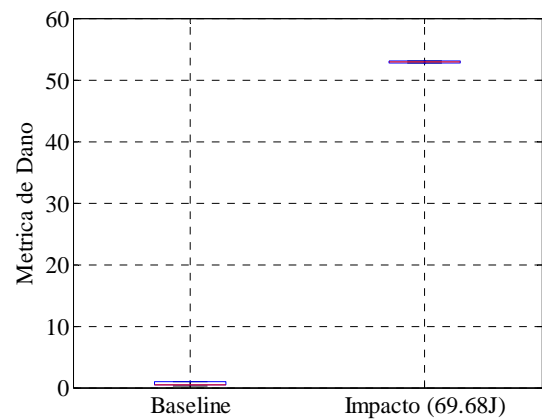
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.20 - Partes reais da função de impedância nas três faixas de frequência e respectivos valores da métrica de dano para a placa 14, impactada com ponteira $\phi=25,40$ mm e energia $E=69,68$ J.

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), como mostrado nas figuras 5.19(a) e 5.19(b), respectivamente. Comparando os valores das métricas de dano apresentados na Tabela 5.1, 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.

Tabela 5.1 - Valores das métricas da Placa 14 (PZT 1 e PZT 3)

Faixa de Frequência	Placa 14 - PZT 1 (25.4 mm)			Placa 14 - PZT 3 (25.4 mm)		
	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

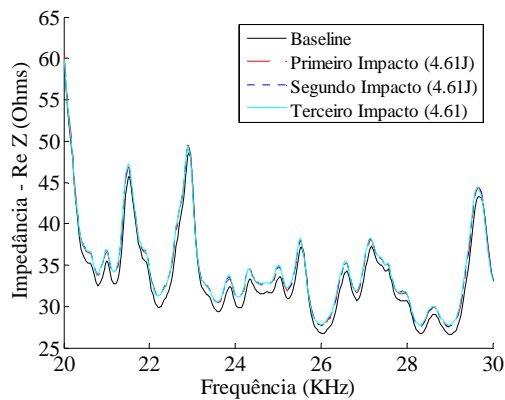
5.6 Ensaio dos corpos de prova 6 e 15 (impactos múltiplos, E=4,61 J)

Como explicado no capítulo anterior, ensaiaram-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 KHz a 30 KHz, 35 KHz, a 45 KHz e 60 KHz, a 80 KHz, 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 12,5 mm e 25,4 mm. Deve-se ressaltar que impactos múltiplos com estas características são raramente encontrados em situações práticas. Não obstante, o interesse em considerar tal situação reside na possibilidade de se examinar cenários de falha diferente daqueles considerados nos testes precedentes, considerando-se ainda que a severidade do dano deva aumentar com o aumento do número de impactos sucessivos.

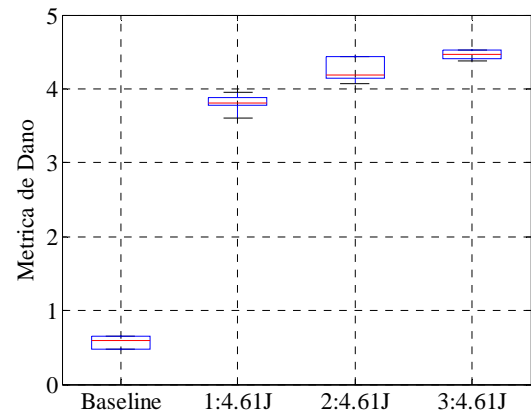
As placas 6 e 15 foram impactadas três vezes com energia de 4,68 J e ponteiras de 12,54 mm e 25,40 mm de diâmetro, respectivamente. Com a mesma metodologia aplicada nas placas com impactos simples, analisaram-se os resultados obtidos. As partes reais das funções de impedância para a faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz são apresentadas nas Figuras 5.21(a) e 5.21(c), ao passo que os diagramas de caixas da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.21(b), 5.21(d). Pode-se perceber, tanto para a placa 6 como para a placa 15, que os

valores da métrica de dano aumenta continuamente com o número de impactos, o que é coerente com a idéia de que a intensidade do dano aumenta no mesmo sentido.

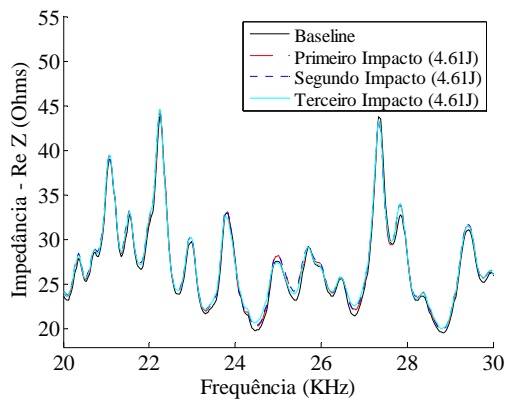
Comparando os valores da métrica obtidos para as placas 6 e 15, notam-se valores maiores para a primeira, o que leva a concluir que o impacto com a ponteira de diâmetro 12,54 mm produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm.



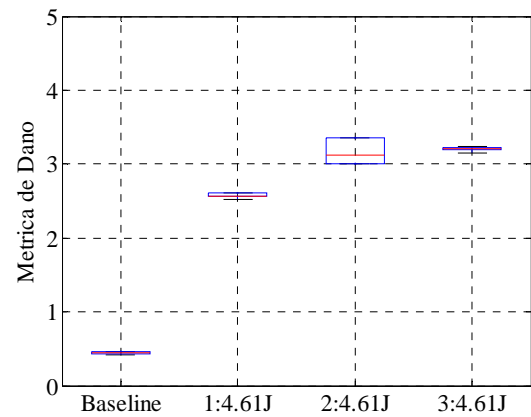
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.21 - (a) e (c): Partes reais da função de impedância na faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz para as placas 6 e 15, respectivamente; (b) e (d): valores da métrica de dano para a placas 6 e 15, respectivamente.

5.7 Ensaaios dos corpos de prova 7 e 16 (impactos múltiplos, $E=8,78$ J)

As placas 7 e 16 foram impactadas três vezes com as ponteiros de 12,54 mm e 25,40 mm de diâmetro, respectivamente, e energia de 8,78 J.

As partes reais das funções de impedância para a faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz são apresentadas nas Figuras 5.22(a) e 5.22(c), ao passo que os diagramas de caixas da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.22(b), 5.22(d).

Pode-se perceber, para a placa 7, um contínuo decréscimo dos valores da métrica de dano, para impactos sucessivos, 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.

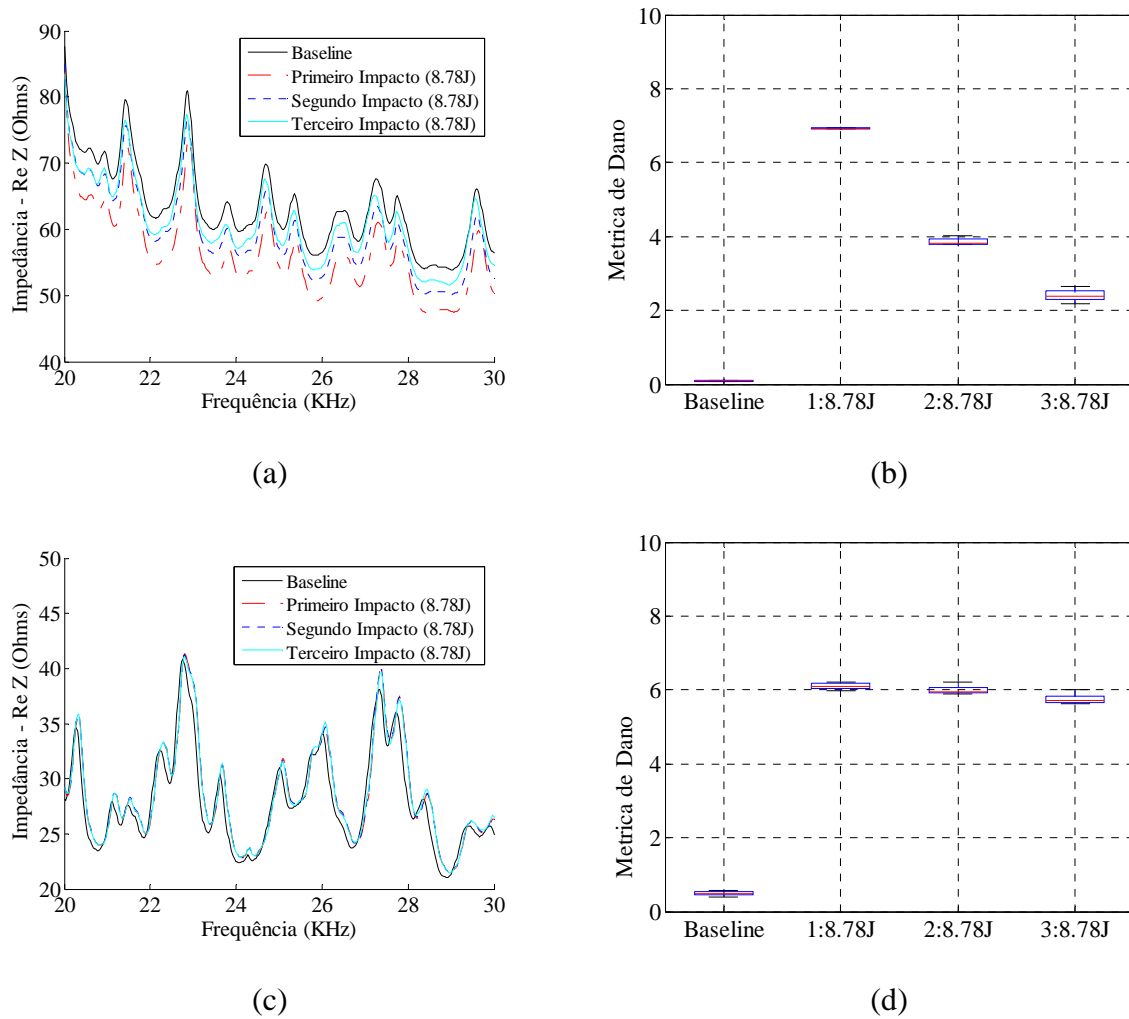


Figura 5.22 - (a) e (c): Partes reais da função de impedância na faixa de frequências de 20 KHz a 30 KHz para as placas 8 e 17, respectivamente; (b) e (d): valores da métrica de dano para a placas 8 e 17, respectivamente.

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

5.8 Ensaio dos corpos de prova 8 e 17 (impactos múltiplos, E=15,0 J)

As placas 8 e 17 foram impactadas de forma similar à empregada nos ensaios precedentes, com energia de 8,78 J.

As partes reais das funções de impedância para a faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz são apresentadas nas Figuras 5.23(a) e 5.23(c), ao passo que os diagramas de caixas da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.23(b) e 5.23(d).

Pode-se perceber que, 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 12,54 mm produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm.

5.9 Ensaio dos corpos de prova 9 e 18 (Impactos Múltiplos, E=20,0 J)

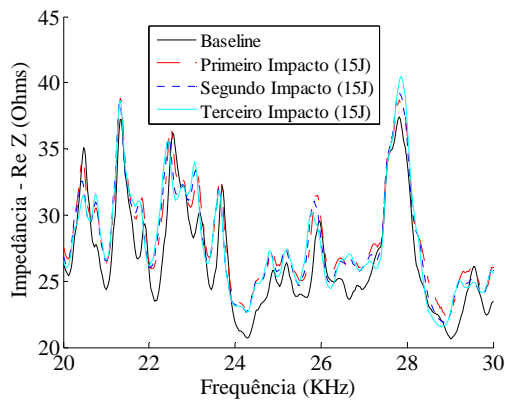
As placas 8 e 17 foram impactadas de forma similar à empregada nos ensaios precedentes, com energia de 20,0 J.

As partes reais das funções de impedância para a faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz são apresentadas nas Figuras 5.24(a) e 5.24(c), ao passo que os diagramas de caixas da métrica de dano são mostrados nas Figuras 5.24(b) e 5.24(d).

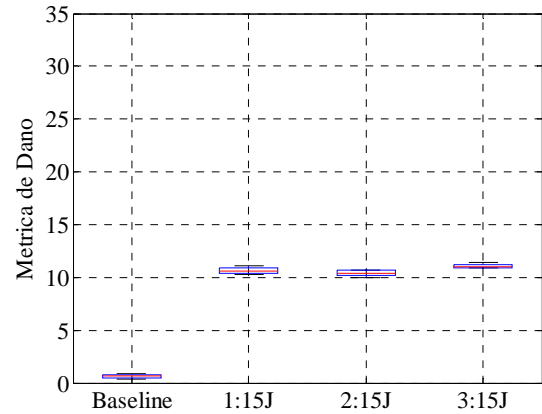
Para a placa 9 nota-se um contínuo ligeiro aumento dos valores com o número de impactos. Por outro lado, para a placa 18, os valores da métrica de dano apresentam ligeiro decréscimo com o número de impactos.

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

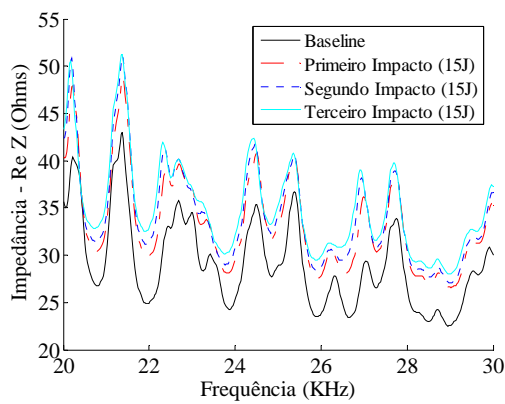
diâmetro 12,54 mm produz a uma condição mais severa de dano que o impacto com a ponteira de diâmetro 25,40 mm.



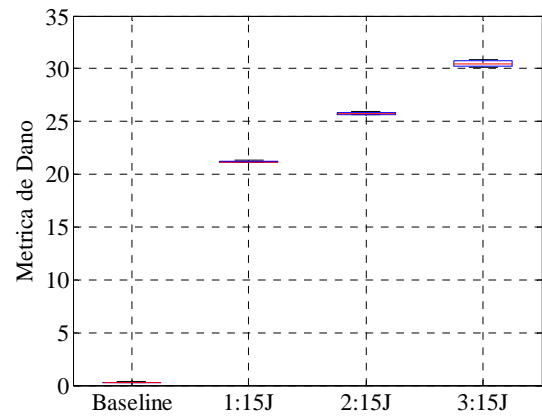
(a)



(b)

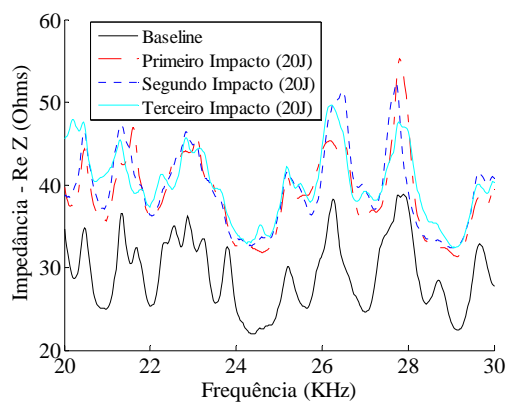


(c)

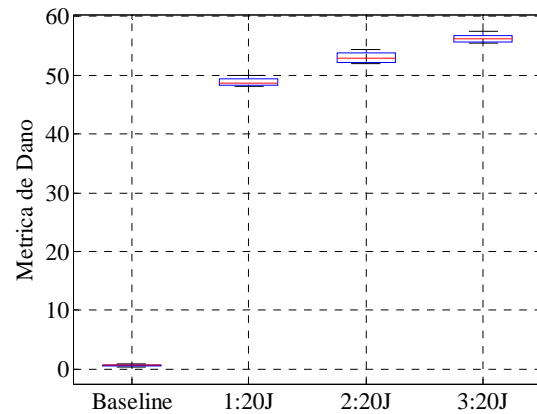


(d)

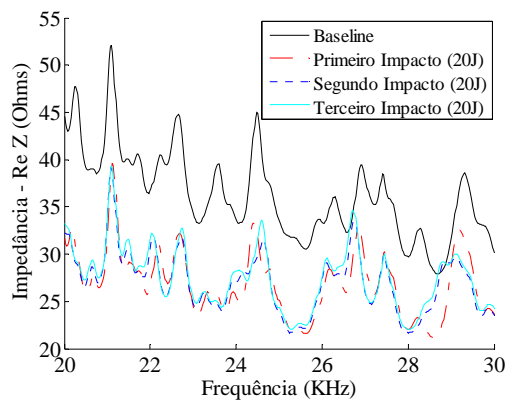
Figura 5.23 - (a) e (c): Partes reais da função de impedância na faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz; (b) e (d): respectivos valores da métrica de dano para a placas 8 e 17, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e $\phi=25,40$ mm, respectivamente com energia $E=15$ J.



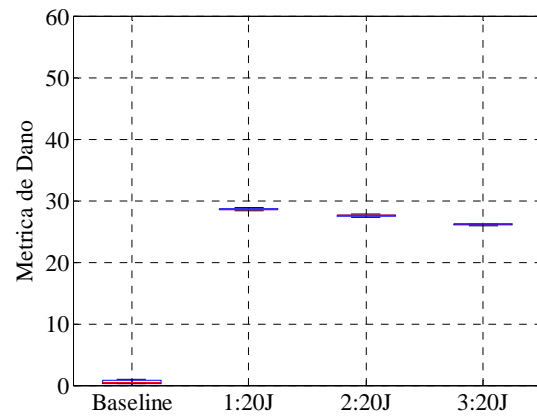
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.24 - (a) e (c): Partes reais da função de impedância na faixa de frequência de 20 KHz a 30 KHz; (b) e (d): respectivos valores da métrica de dano para a placas 9 e 18, impactada com ponteira $\phi=12,54$ mm e $\phi=25,40$ mm, respectivamente com energia $E=20$ J.

5.10 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 o número de impactos, no caso de impactos múltiplos.

5.10.1 Impactos simples

A partir da Tabela 5.2, que apresenta os valores da métrica do dano em todas as faixas de frequência e energia para os dois tipos de ponteiros. 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 na Tab.5.2. Adotou-se um modelo baseado em redes neurais artificiais.

Tabela 5.2 - Tabela com os valores da métrica do dano de acordo com a faixa de frequência e energia utilizadas.

Energia (J)	Diâmetro da Ponteira: 12.5 mm			Diâmetro da Ponteira: 25.4 mm		
	20 KHz-30KHz	35KHz-45KHz	60KHz-80KHz	20KHz-30KHz	35KHz-45KHz	60KHz-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
15,00	13,4339	13,5700	49,5813	6,0172	11,2813	8,7919
20,00	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.5.25), 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.5.26). 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			

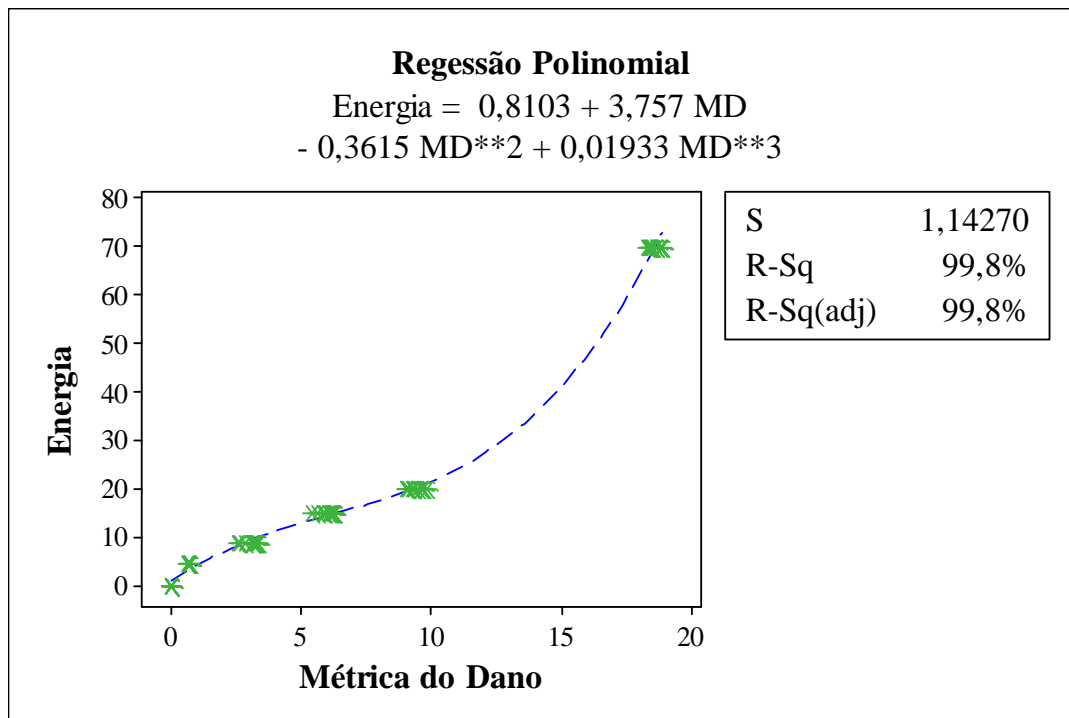


Figura 5.25 - Gráfico da regressão polinomial (métrica do dano x Energia).

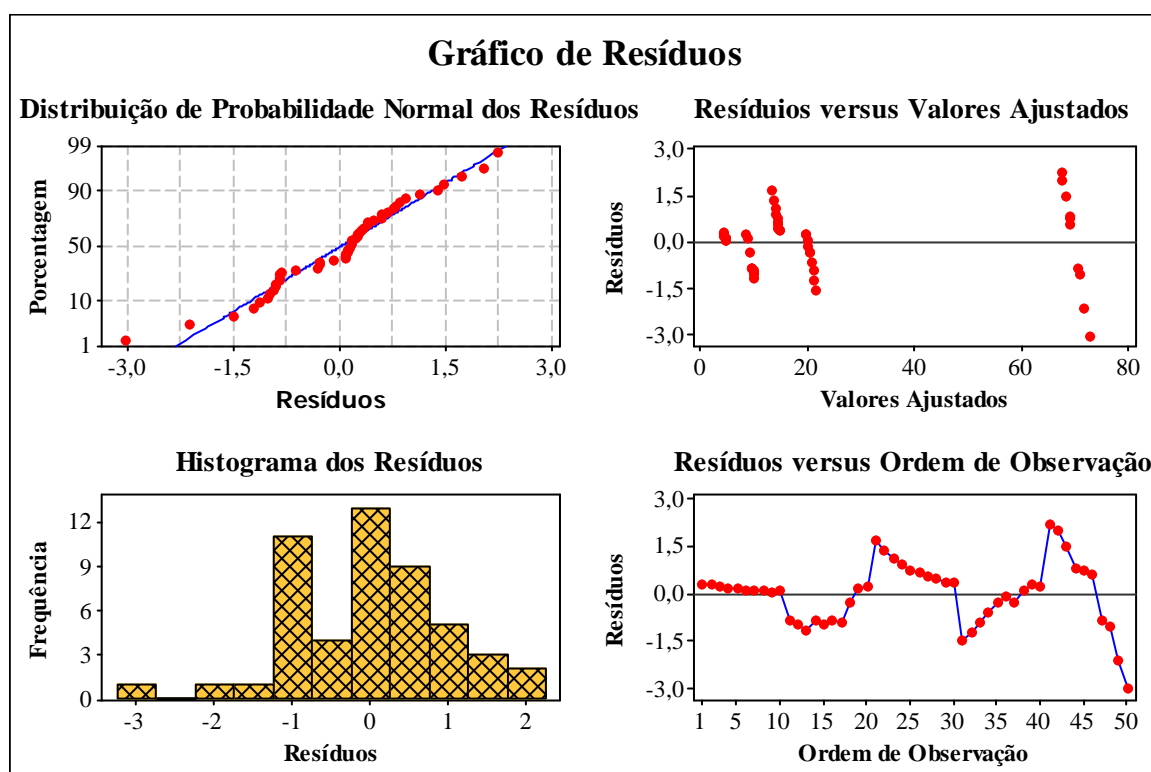


Figura 5.26 - Gráficos de Resíduos para regressão polinomial.

5.10.2 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 5.3. 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 na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tabela com os valores da métrica do dano após os impactos de acordo com a faixa de frequência e energia utilizadas.

Diâmetro da Ponteira	Energia	Métrica do Dano								
		20KHz-30KHz			35KHz-45KHz			60KHz-80KHz		
		1º Impacto	2º Impacto	3º Impacto	1º Impacto	2º Impacto	3º Impacto	1º Impacto	2º Impacto	3º Impacto
12,5 mm	4.61J	3,84640	4,20560	4,46217	2,96833	3,47867	4,04000	2,29700	2,75317	4,06533
	8.78J	6,77600	1,52317	0,98217	8,68033	4,92033	2,04600	8,67250	4,57850	6,29250
	15J	10,64783	10,38533	11,07567	13,39100	11,96767	11,58733	29,24983	21,51533	20,89117
	20J	48,87383	52,99417	56,29133	46,49683	46,25183	47,45933	137,40117	151,79783	151,94017
25,4 mm	4.61J	2,57417	3,23817	3,20733	1,67217	2,32933	2,18167	2,12817	2,09867	2,33700
	8.78J	6,10533	5,98867	5,75417	6,62600	6,41233	6,40200	4,88583	4,84267	4,92150
	15J	21,19667	25,75067	30,47333	30,69150	35,58867	39,82800	48,88867	56,73850	61,21383
	20J	28,57500	27,61200	26,14417	24,76383	22,74133	20,57550	19,49233	17,02667	12,61933

Foi implementado um modelo cúbico (Fig.5.29), 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.5.30). 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.

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

Polynomial Regression Analysis: Impacto versus MD

The regression equation is

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

$$S = 0,263230 \quad R\text{-Sq} = 95,4\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 94,7\%$$

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			

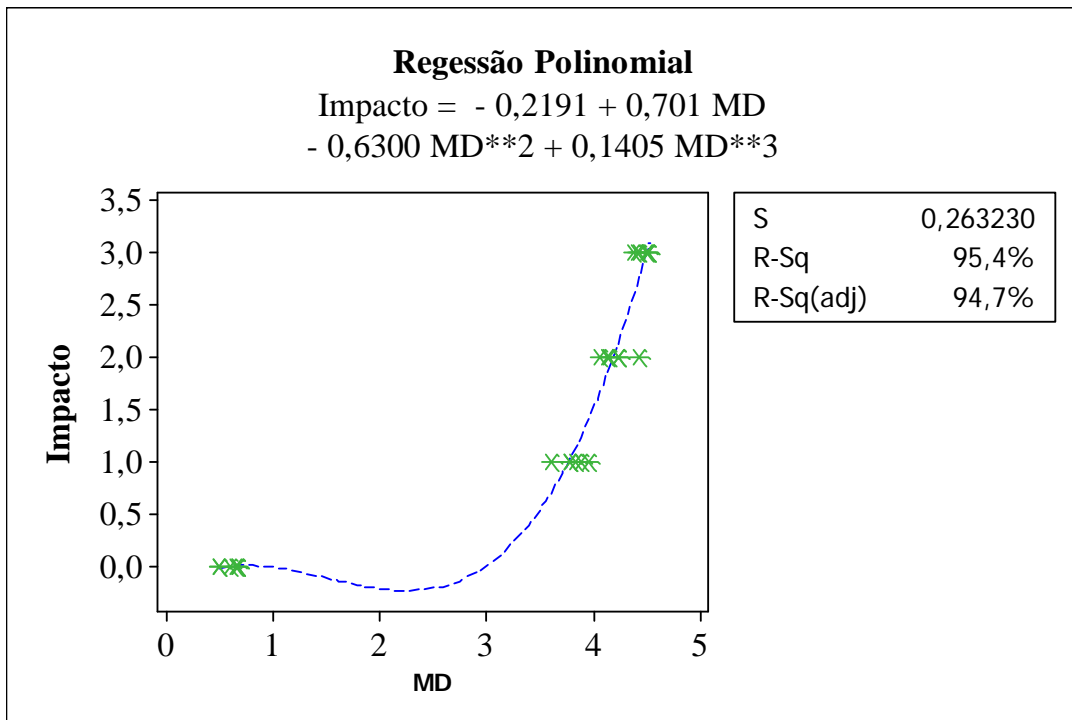


Figura 5.27 - Gráfico da regressão polinomial (métrica do dano x Energia)

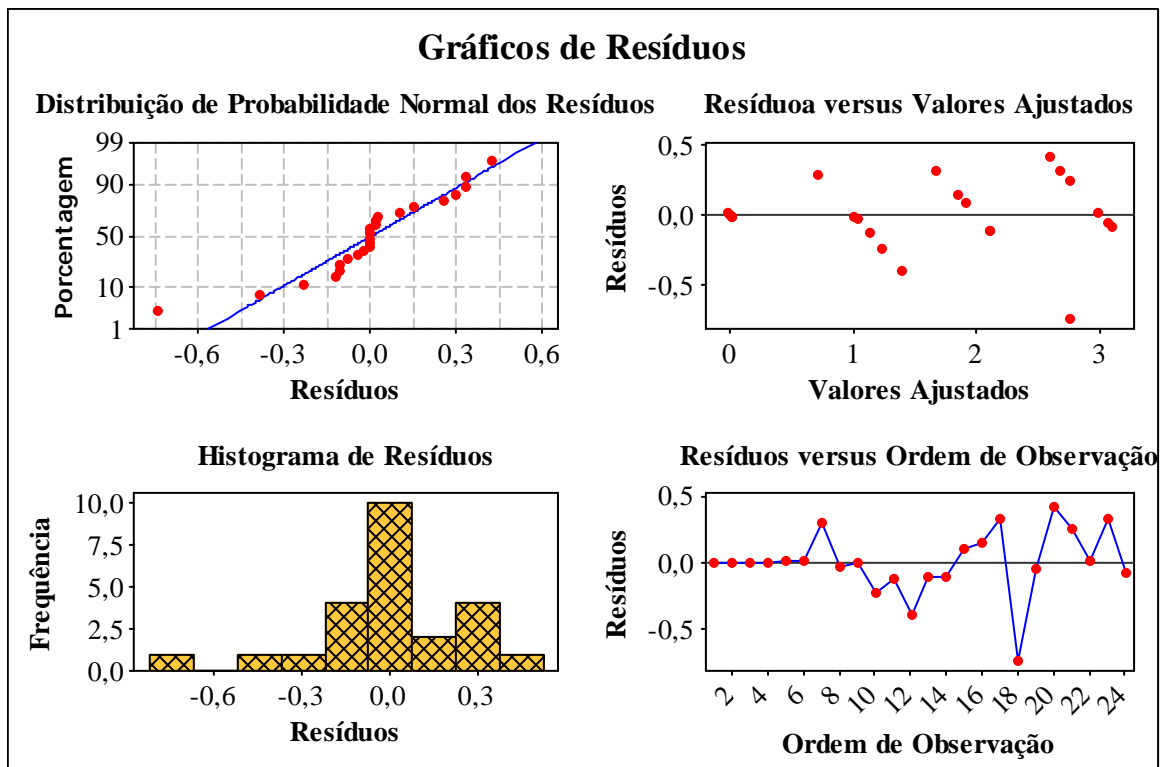


Figura 5.28 - Gráficos de Resíduos para regressão polinomial.

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

São apresentadas neste capítulo as considerações finais do trabalho, assim como perspectivas futuras de continuidade.

6.1 Conclusões

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.

A primeira etapa do trabalho consistiu na concepção e construção de um dispositivo de estrutura pendular destinado à realização de impactos controlados em diferentes condições. O dispositivo mostrou-se muito adequado e poderá ser adaptado facilmente para outras faixas de condições de impacto.

Com restrições determinadas pelo número de corpos de prova disponíveis, 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 à condição de impactos simples ou múltiplos. Também foram examinadas as influências da faixa de frequências na qual a função de impedância é adquirida e do posicionamento dos transdutores piezelétricos quer na face impactada, quer na face oposta à impactada. Idealmente, um número maior de ensaios poderia ter sido realizado para cada condição de teste, com o intuito de avaliar a repetibilidade dos resultados.

A análise dos resultados apresentados no Capítulo 5 permite extrair as seguintes conclusões:

1^a. Em todos os ensaios realizados, foram obtidas variações da métrica de dano superiores às variações desta métrica associadas a 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;

2^a. 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 mostre mais eficiente 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.

3^a. 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 ensaios realizados para investigar esta influência, que se limitaram ao caso de impacto com dano extremamente severo, acredita-se que tal conclusão necessite ser confirmada por ensaios complementares.

4^a. 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.

5^a. 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).

6^a. Foi constatada a conveniência e utilidade das técnicas baseadas em meta modelos 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.

6.2 Perspectivas Futuras

O trabalho realizado no âmbito desta Dissertação de Mestrado complementa a experiência do grupo de pesquisa em SHM do Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, tendo sido o primeiro a tratar de impacto em materiais compostos no âmbito do grupo. Não obstante, o escopo do trabalho é limitado fato que, combinado com o crescente interesse na utilização de materiais compostos, justifica a continuidade do trabalho de pesquisa. Neste sentido, identificam-se as seguintes contribuições futuras:

- Utilização de outras métricas de dano no tratamento de dados dos sinais da impedância, buscando verificar sua sensibilidade aos tipos específicos de danos provocados por impacto em materiais compostos.
- Investigação detalhada dos mecanismos de falha de materiais compostos sujeitos a cargas de impacto, através de técnicas de microscopia, ultra-som e raios-X, objetivando uma melhor caracterização da severidade do dano e uma possível correlação com a métrica de dano.
- Emprego de outras técnicas de SHM, notadamente a baseada nas ondas de Lamb como técnica alternativa ou mesmo em associação com a técnica da impedância eletromecânica, objetivando um aumento da capacidade de detecção e caracterização da severidade de danos causados por impacto em materiais compostos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELIDIS, N., IRVING, P.E., Detection of impact damage in CFRP laminates by means of electrical potential techniques. *Composites Science and Technology*, vol. 67 p. 594–604, 2007.

AMBU, R., AYMERICH, A.F., GINESU, F., PRIOLO, P. Assessment of NDT interferometric techniques for impact damage detection in composite laminates R. *Composites Science and Technology*, vol. 66, p. 199–205, 2006.

ALLEYNE, D. N., CAWLEY, P. The interaction of lamb waves with defects. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 39, p. 381–397, 1992.

BARTELDIS, 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.

BERTHELOT, J.M. *Materiaux Composites – Comportement Mécanique et Analyse des Structures*, Masson, Paris, 620p, 1992, ISBN : 2-225-82588-2.

BORG, R., NILSSON, L., SIMONSSON, K., Simulation of low velocity impact on fiber laminates using a cohesive zone based delamination model. *Composites Science and Technology*, vol. 64, p.279-288, 2004.

BOTELHO, E.C., SILVA, R.A., PARDINI, L.C., REZENDE, M.C. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Materials Research*, Vol. 9, p. 247-256, 2006.

BRAY, D.E., MCBRIDE, D. **Nondestructive Testing Techniques**. John Wiley and Sons. 1992.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Editora LTC, 5 Ed., Rio de Janeiro, RJ, 2002. ISBN: 85-216-1288-5.

CANTWELL, W.M., MORTON, J. An assessment of residual strength of impact damage carbon fiber reinforced epoxy. *Composite Structures*. vol.14, p.3030-317, 1990.

DAVIS, H., MANSFIELD, R. *The Wi-Fi Experience: Everyone's Guide to 802.11B Wireless Networking*. USA. Que Press, 2002.

DÍAZ VALDÉS, S.H., SOUTIS, C. Health monitoring of composites using Lamb waves generated by piezoelectric devices. *Plastics, Rubber and Composites*, vol.29(9), p.475–481, 2000.

DIAMANTI, K., SOUTIS, C., HODGKINSON, J.M. Non-destructive Inspection of a Sandwich and Repaired Composite Laminated Structures. *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 2059-2067, 2005.

DIAMANTI, K., HODKINSON, J. M., SOUTIS, C. Detection of low- velocity impact damage in composite plates using lamb waves. *Structural Health Monitoring*, 2004.

DOEBLING, S. W., FARRAR, C. F., PRIME, M. B., SHEVITS, D. W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review”, Los Alamos National Laboratory, USA, , 1996.

DUAN, S.M., YE, T.Q., Three dimensional frictional dynamic contact analysis for predicting low-velocity damage in composites laminates, *Advances in Engineering Software*, vol. 33, p. 9-15, 2002.

FARIA, A. W. **Modelagem por elementos finitos de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica.** 2006. 152f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

FARRAR, C.R., LIEVEN, N.A.J., BEMENT, M.T., An Introduction to Damage Prognosis, *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System*, Cap.1, p. 1-12, 2005.

FRISWELL, M. I.; PENNY, J. E. The practical limits of damage detection and location using vibration data, *Proceedings of 11th VPI and SU Symposium on Structural Dynamics and Control*, Blacksburg, VA, USA, p. 1-10, 1997.

GAY, D.; HOA, S.V.; TSAI, S.W. **Composites materials: design and applications**, 4 ed.. CRC Press, Paris, FR, ISBN: 1-58716-084-6

GRONDEL, S., ASSAAD, J., DELEBARRE, C., MOULIN, E. Health Monitoring of a Composite Wingbox Structure. *Ultrasonics*, vol. 42, p. 819-824, 2004.

GRISSE, B. J., PEAIRS, D. M., INMAN, D. J. Impedance-based Health Monitoring of Composites., In *Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII)*, Dearborn, Michigan, USA, paper no. 274, 2004.

GIURGIUTIU, V., “Actuators and Smart Structures”, *Encyclopedia Of Vibrations Academic Press*, 2000.

GIURGIUTIU, V., ZAGRAI, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. *Structural Health Monitoring*, vol.4(2), p.99-118, 2005.

HANAGUD, S., LUO, H. Damage Detection and Health Monitoring based on Structural Dynamics. *Structural Health Monitoring, Current Status and Perspectives*, Stanford University, Palo Alto, California, USA, 715–726, 1997.

HONSUR, M.V, JAIN, K., CHOWDHURY, F., JEELANI, S., BHAT, M.R., MURTHY, C.R.L. Low-velocity impact response of carbon/epoxy laminates subjected to cold–dry and cold–moist conditioning *Composite Structures*, vol. 79, p. 300–311, 2007.

KABEYA, K. **Structural Health Monitoring Using Multiple Piezoelectric Sensors and Actuators**. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg, USA, 1998.

KESAVAN, A., JOHN,S., HERSZBERG,I. Structural health monitoring of composite structures using artificial intelligence protocols. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*; 19; 63 2007.

KIM, J. S., CHUNG, S. K. A study on the low-velocity impact response of laminates for composite railway bodyshells. *Composite Structures*, vol. 77, p. 484–492, 2007.

KIM, J. S., LEE, S., SHIN K., A manufacturing a structural safety evaluation of a composite train carbody. *Composite Structures*, vol. 78. p. 468–476, 2007.

KISA, M. Free vibration analysis of a cantilever composite beam with multiple cracks. *Composites Science and Technology*, vol.64, p. 1391–1402, 2004.

LIANG, C., SUN, F.P., ROGERS, C.A. 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, 1994.

LICHTENWALNER, P.F., SOFGE, D.A. Local area damage detection in composite structures. *Proceedings SPIE Symposium on Smart Structures and Materials*, vol. 3326, p. 406-417, 1998.

LIFSHITZ, J. M., ROTEM, A., Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique. *Journal of Composite Materials*, vol. 3, 412–423, 1969.

LOPES Jr, V., PARK, G., CUDNEY, H.H., INMAN, D.J. Smart Structures Health Monitoring Using Artificial Neural Network. 2nd International Workshop Health Monitoring, Stanford, CA, 1999.

MAL, A., RICCI, F., BANERJEE, S., SHIH, F. A conceptual structural health monitoring of composites by a vibration technique. *Structural Health Monitoring*, vol.4, p.283-293, 2005.

MALLICK, P. K. **Composites Engineering Handbook**. Marcel Dekker, INC, New York, US, 1997, 1249p. ISBN: 0-8247-9304-8.

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.

MONTALVÃO, D., MAIA, M.M., RIBEIRO, M.R. A review of vibration- based structural health monitoring with emphasis on composite materials. *The Shock Vibration Digest*, vol. 38, p. 295-323, 2006.

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.

MOURA Jr., J.R.V. **Métodos de identificação de falhas em estruturas aeronáuticas utilizando meta-modelagem aliada às técnicas de impedância e estruturas inteligentes**. 2004. 158f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

MOURA Jr., J. R. V., STEFFEN Jr., V. Impedance-based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation. In Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII), Dearborn, Michigan, USA, paper no. 161, 2004.

MOURA JR., J.R.V. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 2008. 249f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

NAIK, N.K., SEKHER, Y.C., MEDURI, S. Damage in composites subjected to low-velocity impact. *Composites Science and Technology*, vol. 60, p.731-744, 2000.

OCHOA, O.O., SALAMA, M.M. Offshore composites: transitions barriers to an enabling technology. *Composites Science and Technology*, vol. 65, p.2588-2596, 2005.

PALOMINO, L. V. **Análise das Métricas de Dano associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

PARK, G., INMAN, D.J., “Impedance –based structural health monitoring”, *Damage Prognosis For Aerospace, Civil and Mechanical System*, cap.1, pp. 275-291, 2005.

PARK, G., RUTHERFORD, A. C., SOHN, H., FARRAR, C. R. An Outlier Analysis Framework for Impedance-based Structural Health Monitoring. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 286, 229–250, 2005.

PEAIRS, D.M. **High frequency modeling and experimental analysis for implementation of impedance-based structural health monitoring** Doctor Thesis. Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg, USA, 2006.

PEAIRS, D. M., PARK, G., INMAN, D. J. Impedance-based SHM Modeling using Spectral Elements and Circuit Analysis. In Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII), Orlando, Florida, USA, paper no. 232, 2005

RAJU, V. **Implementing impedance-based health monitoring**. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg, USA, 1997.

REZENDE, M.C., BOTELHO, E.C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial, *Polímeros. Ciência e Tecnologia*, vol. 10, n.º 2000.

RICCI, F., BANERJEE, S., MAL, A. K. Health monitoring of composite structures using wave propagation data. In Proceedings of the 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring, Forum am Deutschen Museum, Munich, Germany, 1035–1042, 2004.

ROCHA, T. L. **Modelagem de estruturas inteligentes**. 2004. 124f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

SARAVANOS, D. A., BIRMAN, V., HOPKINS, D. A. Detection of delaminations in composite beams using piezoelectric sensors. In Proceedings of the 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, p. 181–191, 1994.

SIMMERS JR., G., SODANO, H., PARK, G., INMAN, D. J. Impedance based Structural Health Monitoring to Detect Corrosion. In Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII), Orlando, Florida, USA, paper no. 56, 2005.

SHOONREBERG, W.P., YANG, F. Response of space structures to orbital debris particle impact. *Int J. Impact Eng*, vol. 14, p.647-658, 1993.

SHU, D., DELLA, C. N. Vibrations of multiple delaminated beams. *Composite Structures*, vol. 64, p. 467–477, 2004.

SOHN, H., FARRAR, C. R., HEMEZ, F. M., SHUNK, D. D., STINEMATES, D. W., NADLER, B. R. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001, Los Alamos National Laboratory, USA, 2003.

SOHN, H., PARK, G., WAIT, J. R., LIMBACK, N. P., FARRAR, C. R. Wavelet-based signal processing for detecting delamination in composite plates. *smart materials and structures*, vol. 13, p. 153–160, 2004b.

SU, Z., YE, L., LU, Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, p. 753-780, 2006.

SUN, F.P., CHAUDHRY, Z., LIANG, C., ROGERS, C.A. Truss structure integrity identification using PZT sensor–actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 6, 134–139, 1995.

TEBALDI, A., COELHO, L.S., LOPES Jr., V.L., Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos. *Revista Controle & Automação*, vol.17, p.312-330, 2006.

TIPPETTS, T., HEMEZ, F. M. Non-Linear Models of Composite Laminates. In *Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII)*, Orlando, Florida, USA, paper no. 10, 2005.

TODD, M. D., *Optical- Based Sensing, Damage Prognosis*, Irman D.J Inman, editor John Wiley and Sons Inc., pp. 343-360, 2004.

ZAGRAI, A.N., GIURGIUTIU, V. Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*; vol. 12, p. 709, 2005.

ZHENG, S., WANG, X., LIU, L. Damage detection in composite materials based upon the computational mechanics and neural networks. In *Proceedings of the 2nd European*

Workshop on Structural Health Monitoring, Forum am Deutschen Museum, Munich, Germany, p. 609–615, 2004.

WILCOX, P., LOWE, M., CAWLEY, P. Lamb and SH wave transducer arrays for the inspection of large areas of thick plates. In: Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. (eds.), Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, (pp. 1049–1056). New York: Plenum Press, 2000.

WRIGHT, S.C., FLECK, N.A., STRONG, W.J. Ballistic impact of polycarbonate – an experimental investigation. International Journal of Impact Engineering, vol.13, p.1-20, 1993.

Anexo A

Procedimento de Cálculo da Energia de Impacto

Os valores das energias de impacto foram calculadas a partir do Princípio da Conservação da Energia Mecânica, com base na hipótese de que os efeitos dissipativos são desprezíveis. Com base no esquema apresentado na Figura A.1, no qual G indica a posição do centro de massa do conjunto móvel (haste+massas adicionais+sapata do freio e demais peças acessórias), e admitindo que o conjunto seja liberado do repouso na posição determinada pelo ângulo θ , a energia de impacto é dada pela expressão:

$$E = \frac{1}{2} mg(H + L \sin \theta)$$

onde m é a massa total do conjunto móvel.

Combinando-se os valores de m , L e θ , foram obtidos os valores de energia utilizados nos testes de impacto, com o auxílio de um programa elaborado em linguagem MATLAB[®], conforme mostrado na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Parâmetros utilizados para obtenção das energias de impacto

E (J)	m (kg)	L (m)	θ (graus)
4,61	1,3040	0,392	-30
8,78	1,6210	0,509	-30
15,00	1,6210	0,509	0
20,00	2,0960	0,550	0
69,68	6,9200	0,508	90

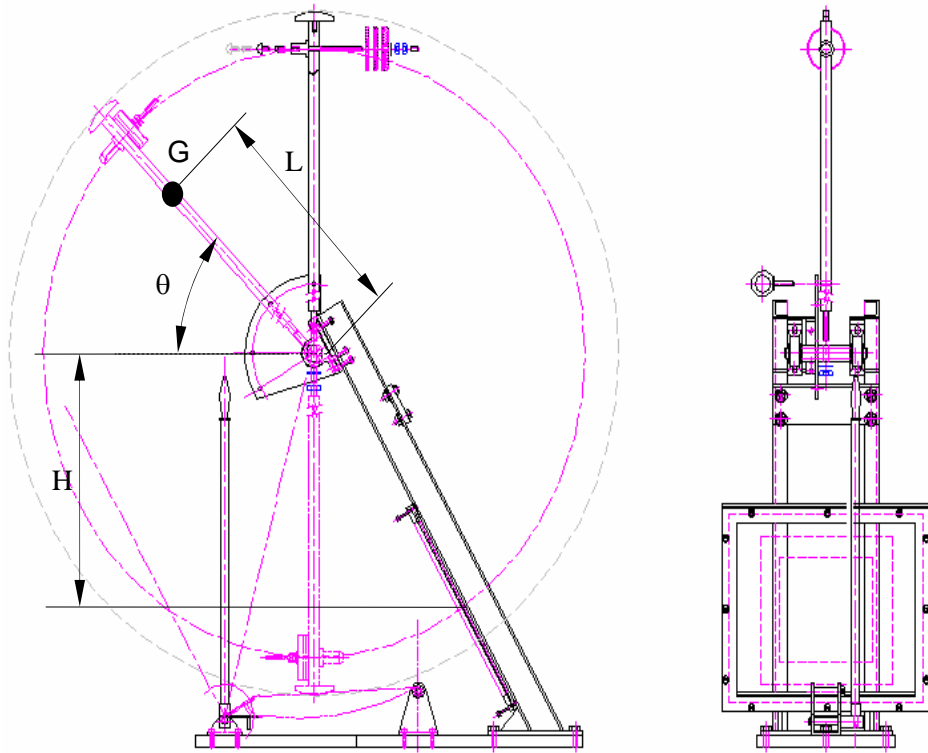


Figura A.1 – Esquema do aparato experimental

Apêndice B

Apresentação de Dados (Diagrama de Caixa - Box Plot)

O diagrama de caixa é uma apresentação gráfica que descreve simultaneamente várias características importantes de um conjunto de dados, tais como centro, dispersão, simetria e identificação das observações que estão surpreendentemente longe do seio dos dados. (Essas observações são chamadas *outliers*.)

Um diagrama de caixa apresenta três quartis, o mínimo e o máximo dos dados em uma caixa retangular, alinhados tanto verticalmente ou horizontalmente. A caixa inclui a amplitude interquartil, com o canto esquerdo (ou inferior) no primeiro quartil, q_1 e o canto direito (ou superior) no terceiro quartil, q_3 , uma linha é desenhada, através da caixa, no terceiro quartil (que é o percentil 50 ou a mediana), $q_2 = \tilde{x}$. Uma linha estende-se de cada extremidade da caixa. A linha inferior começa no primeiro quartil indo até o menor valor do conjunto de pontos dentro da faixa de 1,5 interquartil a partir do primeiro quartil. A linha superior começa no terceiro quartil indo até o maior valor do conjunto de pontos dentro das faixas de 1,5 interquartil do terceiro quartil. Dados mais afastados do que os bigodes são graficados como pontos individuais. Um ponto além da linha, porém a menos de 3 amplitudes interquartis da extremidade da caixa, é chamado *outlier interno*. Um ponto a mais de 3 faixas interquartis da extremidade da caixa é chamado de *outlier externo*. ver figura A3.1. Ocasionalmente, símbolos diferentes, tais como círculos abertos e fechados, são usados para identificar os dois tipos de *outliers*. Algumas vezes, diagramas de caixa são chamados de diagramas de caixa e linha.

Os diagramas de caixa são muito úteis em comparações gráficas entre conjuntos de dados, uma vez que tem alto impacto visual e são fáceis de entender.

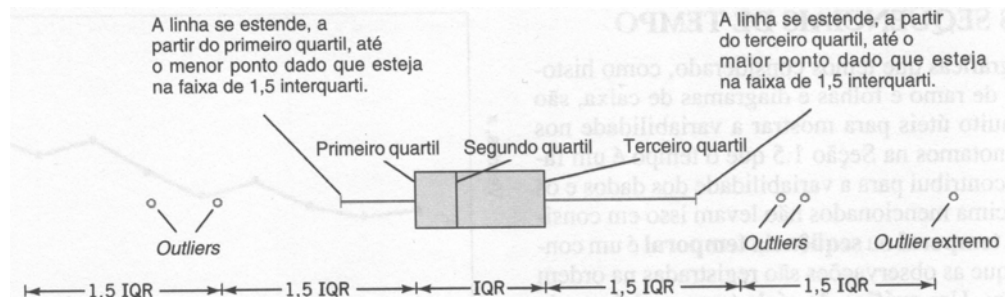


Figura 1B: Descrição do diagrama de caixa (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Por exemplo, na figura A3.2, mostra os diagramas comparativos de caixa para o índice de qualidade de fabricação em equipamentos semicondutores, em três plantas de fabricação. E inspeção dessa apresentação revela que existe muito mais variabilidade na planta 2 e que nas plantas 2 e 3 precisam melhorar o desempenho de seus índices de qualidade.

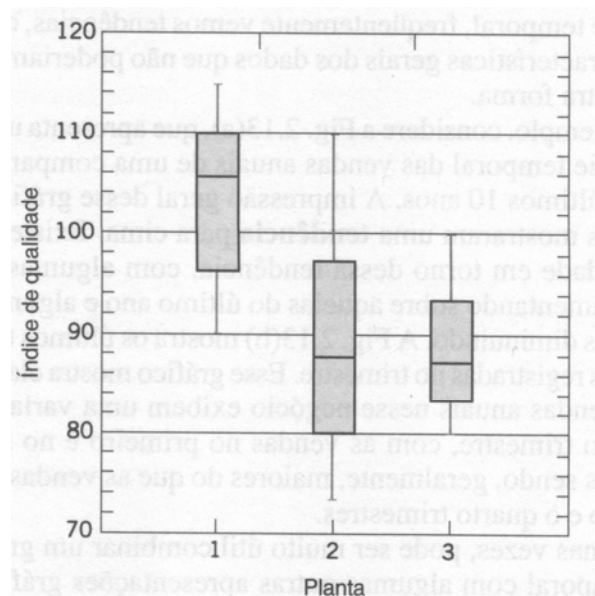


Figura 2B: Diagrama de caixa comparativos de um índice de qualidade de três plantas (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)