



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE CHAPAS DE COMPÓSITO LAMINADO DE ALUMÍNIO E EPÓXI REFORÇADO POR FIBRA DE CARBONO COM AUXÍLIO DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS ULTRASSÔNICOS

Elmo Alberto Teixeira Borges Junior, elmo.alberto@ifba.edu.br¹

Igor Souza Ribeiro, igorsr@ifba.edu.br¹

Eduardo Furtado Simas Filho, esimas@ifba.edu.br¹

Cláudia Teresa Teles Farias, cfarias@ifba.edu.br¹

Lílian Aguiar Sena da Silva, lilian.asena@ifba.edu.br¹

Teodorio Arão Santos de Oliveira, teodorio@ifba.edu.br¹

¹Instituto Federal da Bahia - IFBA, Rua Emídio dos Santos, s/n.

Resumo: A atualização tecnológica exigida pela indústria aeroespacial vem contribuindo com o desenvolvimento de novos materiais. Os compósitos laminados fibra metal (LFM) apresentam uma estrutura tipo sanduíche, com finas lâminas metálicas e camadas de pré-impregnados constituídas de matriz polimérica reforçada por fibra, combinando baixa densidade, resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas. No entanto, uma grande variedade de modos de deformação pode levar à falha destes compósitos. Este trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência do ensaio não destrutivo ultrassônico, em configuração pulso eco por imersão, na detecção de danos do tipo fratura de fibras e delaminação em compósito laminado de alumínio e epóxi reforçado por fibra carbono, com aplicação de técnicas de processamento digital de sinais. Os resultados indicam que a análise através das Transformadas Wavelet e de Fourier pode ser uma ferramenta auxiliar na detecção de descontinuidades nestes materiais de natureza heterogênea e anisotrópica.

Palavras-chave: compósito laminado fibra metal, ensaio não destrutivo ultrassônico, processamento digital de sinais, integridade estrutural.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do desenvolvimento de materiais de elevadas razões resistência/peso e módulo de elasticidade/peso tem contribuído para o surgimento de linhas de pesquisa nas áreas afins aos compósitos (Montes, 1998). Na indústria aeroespacial, materiais laminados fibra metal (LFM) são comumente utilizados, com fins de reduzir o peso total e os custos com consumo de combustível e manutenção. No entanto, uma grande variedade de modos de deformação pode levar à falha dos LFM, e a monitoração do surgimento e evolução dos danos pode ser realizada através de métodos não destrutivos, como raios-X, holografia e o ultrassom. Todavia, apesar de serem bastante utilizados na avaliação da integridade estrutural de equipamentos metálicos, os ensaios ultrassônicos em materiais compósitos tendem a prover resultados de difícil interpretação, devido à existência de múltiplas lâminas de espessuras reduzidas.

Neste trabalho é proposto o emprego da técnica não destrutiva ultrassônica convencional por imersão para inspeção de laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibra de carbono, com auxílio da aplicação de técnicas de processamento digital de sinais. Desta forma, espera-se reduzir o grau de interpretação do inspetor, através do fornecimento de resultados de simples análise. A extração de características a partir da utilização das Transformadas de Fourier e Wavelet consegue auxiliar significativamente a detecção de descontinuidades nestes materiais de natureza altamente heterogênea e anisotrópica, como etapa preliminar à classificação automática dos padrões de sinais referentes à regiões com delaminação, com fratura de fibra e sem defeito.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Compósitos Laminados Fibra-Metal

Compósitos são materiais multifásicos que apresentam contribuição das propriedades de todas as fases que o integram, derivando características, em geral, melhores que se os materiais fossem analisados individualmente. Muitos combinam apenas dois componentes: a matriz e componente disperso. Quanto ao tipo de componente disperso, os compósitos fibrosos são os que possuem as melhores propriedades de resistência e rigidez, tornando-os muito interessantes para aplicações estruturais. Além disso, com os materiais compósitos é possível obter uma larga faixa de propriedades, através da distribuição e quantidade relativa de cada componente, visando determinadas aplicações (Beber, 2003).

Os compósitos laminados fibra-metal (LFM) são formados por uma estrutura do tipo sanduíche, com camadas alternadas de finas chapas metálicas e de pré-impregnados (prepreg) constituídos de matriz polimérica reforçada por fibra. Como resultado, os LFM normalmente combinam baixa densidade, resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas (Farias, 2006).

Quando aplicadas solicitações externas sobre compósitos reforçados com fibras, a matriz absorve uma pequena parcela, distribuindo a maior parte para as fibras. Para tal, a adesão entre as fibras e a matriz deve impedir o arrancamento das fibras na fratura (Beber, 2003).

Na indústria aeronáutica, onde a segurança é fator crítico, os pré-impregnados constituem a matéria-prima básica para a manufatura de compósitos estruturais. As peças fabricadas com estes materiais são caracterizadas pela elevada resistência mecânica específica (resistência/densidade) e módulo de elasticidade específico (módulo/densidade) (Montes, 1998).

Os aviões Phenom 100 e Phenom 300, fabricados pela Embraer utilizam materiais laminados reforçados em sua estrutura, e mais recentemente o Boeing B-787 conterá cerca de 50% de seu peso em compósito, o que permitirá que o consumo de combustível seja reduzido em aproximadamente 20% e uma diminuição de até 30% em custos de manutenção. Também na indústria automobilística, os compósitos vêm sendo utilizados com objetivo principal de reduzir o peso total e o consumo de combustível (Romariz, 2008).

Dentre as fibras de reforço para materiais compósitos, as fibras de carbono apresentam relevante utilização, por conta de propriedades, tais como baixa densidade e baixo coeficiente de expansão térmica. Além disso, devido ao elevado módulo de elasticidade, bastante superior ao das outras fibras comercialmente disponíveis, pode-se aumentar a rigidez do compósito, tornando-o competitivo em aplicações industriais. O módulo de elasticidade e as propriedades mecânicas são influenciados, no entanto, pelo grau de orientação das fibras. Na Tab. (1), pode ser observada uma comparação entre propriedades mecânicas de fibras utilizadas comumente em compósitos, sendo AR: alta resistência, AM: alto módulo e AD: alto desempenho (Montes, 1998).

Tabela 1. Comparação de propriedades mecânicas das fibras de vidro, aramida e carbono (Farias, 2006).

PROPRIEDADE	E (GPa)	σ_r (GPa)	Elongação na fratura (%)	Densidade (g/cm ³)
Fibra de vidro S	87	3.50	4.00	2.50
Kevlar 149	180	3.45	1.90	1.47
Fibra de carbono AR	250	2.80	1.20	1.80
Fibra de carbono AM	370	1.70	0.50	1.90
Fibra de carbono AD	230	4.50	2.00	1.80

No entanto, uma grande quantidade de modos de deformação pode levar à falha destes compósitos. Devido ao elevado grau de anisotropia e heterogeneidade das multicamadas e aos complexos modos de falha, a avaliação não destrutiva ultrassônica pode ser considerada mais difícil do que em estruturas metálicas. Estas características refletem diretamente na utilização de maiores coeficientes de segurança durante a fase de desenvolvimento do projeto (Romariz, 2008).

2.1.1. Mecanismos de Falha

Uma grande variedade de modos de deformação pode levar à falha dos LFM, ocorrendo na fibra, na matriz ou na interface entre eles. O modo de falha operante depende, dentre outros fatores, das condições de carregamento e da estrutura interna do sistema, que está associada principalmente ao empilhamento e à direção das fibras, além do diâmetro, fração volumétrica e distribuição geométrica. Danos internos, normalmente devidos a impactos de baixa energia, constituem os tipos de falha mais comumente encontrados nestes materiais e consistem em trincas na matriz polimérica, assim como delaminação e ruptura das fibras, sendo, geralmente, difíceis de serem detectados visualmente (Farias, 2006). O aumento da resistência das fibras de carbono tem por objetivo melhorar a resistência ao impacto, através do acréscimo da energia de deformação até a falha (Romariz, 2008).

O processo de dano normalmente é iniciado por pequenas trincas na matriz, produzindo trincas que se desenvolvem na interface entre duas camadas, podendo ocasionar falhas interlaminares, que surgem na interface entre duas lâminas

adjacentes. Estas se propagam com baixa energia, paralelas às direções das fibras, tendendo a formar delaminações. A delaminação, conforme pode ser visualizada na Fig. (1), causa significativa perda da durabilidade, estabilidade e resistência à compressão. Este processo leva à degradação geral do material e não produz trincas discretas, como acontecem nos metais (Romariz, 2008).

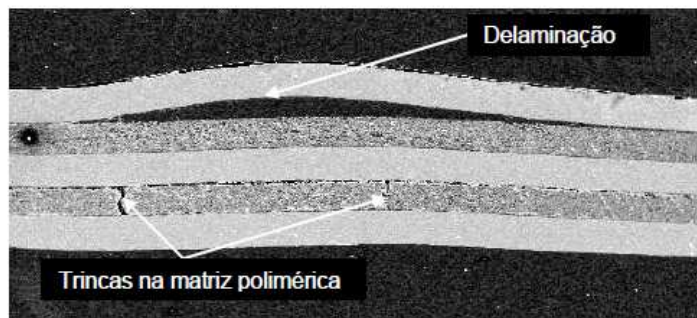


Figura 1. Delaminação e trincas na matriz polimérica em compósito laminado (Farias, 2006).

Diferentes esforços podem induzir a distintos mecanismos de falha. A ruptura das fibras pode ser causada tanto por carregamentos de tração, a depender da adesão entre a fibra e a matriz polimérica, quanto por carregamentos de compressão, através da microflambagem ou o cisalhamento da fibra na forma de “kink bands”, ilustrado na Fig. (2).

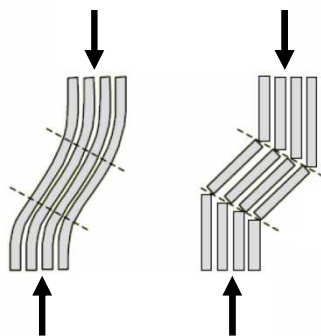


Figura 2. Mecanismo de fratura de fibra por microflambagem (Romariz, 2008).

Enquanto as trincas intralaminares de cisalhamento na matriz tendem a criar delaminações de grande porte na interface inferior, as produzidas por tração na matriz induzem delaminações na interface superior da lâmina. Estes mecanismos de dano são ilustrados na Fig. (3).

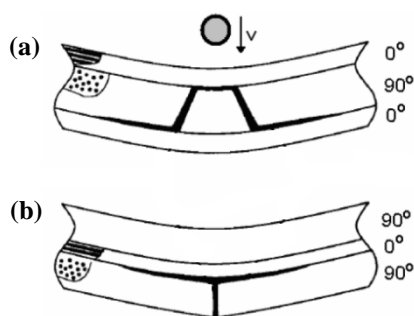


Figura 3. Mecanismo de dano de um compósito sujeito a impacto: (a) Cisalhamento; (b) Flexão (Romariz, 2008).

2.2. Ensaio Ultrassônicos em Materiais Compósitos

Ensaio não destrutivo ultrassônico têm sido utilizados na avaliação de estruturas quanto ao surgimento e à evolução de falhas decorrentes de mecanismos diversos (Nanekar, 2003). Entretanto, em se tratando de compósitos, a eficácia das técnicas ultrassônicas de inspeção é bastante influenciada pela heterogeneidade e anisotropia destes materiais. Por conta da dificuldade de interpretação dos sinais, devido à existência de múltiplas lâminas de pequenas espessuras, ultrassom convencional é pouco adequado. Por outro lado, a análise através de outros domínios, como o da frequência, tem se tornado uma ferramenta que permite a avaliação não destrutiva em compósitos (Kruger, 1996; Kazys, 1996; He, 2001).

O espectro de frequência fornece informações do grau de interação do pulso ultrassônico com o material, funcionando como uma “impressão digital”. Os fenômenos característicos à propagação da onda acústica são responsáveis pela deformação do sinal de ultrassom ao atravessar o material em estudo (Kruger, 1996).

Visando minimizar os ruídos existentes, poderia ser utilizado transdutor de baixa frequência, mas há uma limitação quanto à profundidade e ao tamanho mínimo de falha que pode ser detectada. Em contrapartida, o uso de frequências mais elevadas pode dificultar a avaliação do sinal ultrassônico no domínio do tempo, visto que podem ocorrer reflexões devido às interfaces entre as camadas e aos contornos livres da placa. O desenvolvimento e a aplicação de técnicas adequadas de processamento digital de sinais podem fornecer resultados quantitativos e qualitativos a respeito da existência das discontinuidades em compósitos laminados fibra metal (Romariz, 2008).

Farias (2006) utilizou ondas ultrassônicas de Lamb na inspeção de dois tipos de corpos de prova: alumínio e epóxi reforçado por fibras de vidro; e alumínio e epóxi reforçado por fibras de carbono, utilizando

2.3. Processamento Digital de Sinais

Técnicas de processamento digital de sinais de ultrassom são utilizadas em distintas áreas da avaliação não destrutiva de materiais, a depender da aplicação específica. Nos ensaios não destrutivos ultrassônicos em compósitos, as discontinuidades podem ser detectadas através de métodos de processamento que utilizam transformações de domínio. A utilização da Transformada de Fourier vem sendo aplicada com fins de realizar análise espectral dos sinais ultrassônicos e conseguir detectar informações não muito evidentes no domínio do tempo. Já a análise através da Transformada Wavelet é uma das técnicas mais recentes para processamento de sinais com componentes espectrais não estacionários (Pagodinas, 2002).

2.3.1. Transformada Discreta de Fourier e Análise Espectral de Ecos Ultrassônicos

A Transformada de Fourier é uma técnica matemática que decompõe o sinal em senóides de diferentes frequências. Normalmente se utiliza o algoritmo da FFT (Fast Fourier Transform) para implementar a transformada discreta de Fourier, quando o número de elementos do sinal é uma potência de dois, visto que o processamento é mais rápido que o da DFT (Discrete Fourier Transform), apresentada na Eq. (1) (Oppenheim, 1996; Diniz, 2004).

$$X\left(e^{j\frac{2\pi}{N}k}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \text{ para } 0 \leq k \leq N-1. \quad (1)$$

A análise espectral constitui um dos ramos mais importantes do processamento de sinais, mas o enfoque da utilização nos ensaios não destrutivos é uma vertente ainda pouco explorada e em desenvolvimento. A crescente popularização do emprego desta técnica está fortemente relacionada à eficiência dos resultados que podem ser encontrados (Kruger, 1996).

Na análise espectral ultrassônica, é aplicada a FFT ao eco digitalizado, retornando um vetor de números complexos, dos quais podem-se obter os espectros de módulo e fase. A interação do pulso de ultrassom com o material é quantitativamente dependente das heterogeneidades e da frequência da onda incidente, podendo ser avaliada quanto à modificação no domínio da frequência do pulso transmitido (Kruger, 1996).

2.3.2. Transformada Discreta Wavelet

As Transformadas Wavelet são um desenvolvimento relativamente recente na análise funcional. Em 1985, Mallat obteve resultados que impulsionaram a utilização de wavelets em diversos ramos da pesquisa. As Transformadas Wavelet se baseiam na decomposição do sinal em aproximações e detalhes, um atuando como filtro de alisamento (passa-baixa) e outro trazendo informações de detalhes (passa-alta), respectivamente (Diniz, 2004).

No nível mais básico, o sinal passa por dois filtros complementares, dando origem a dois novos sinais. No entanto, quando se efetua esta operação em sinais digitais reais, dobra-se a quantidade de dados em relação ao original, como mostra a Fig. (4a). Todavia, a decomposição usando wavelets é capaz de manter a quantidade de pontos iniciais, através de um processo denominado sub-amostragem, conforme ilustrado na Fig. (4b), produzindo os coeficientes DWT (Pagodinas, 2002).

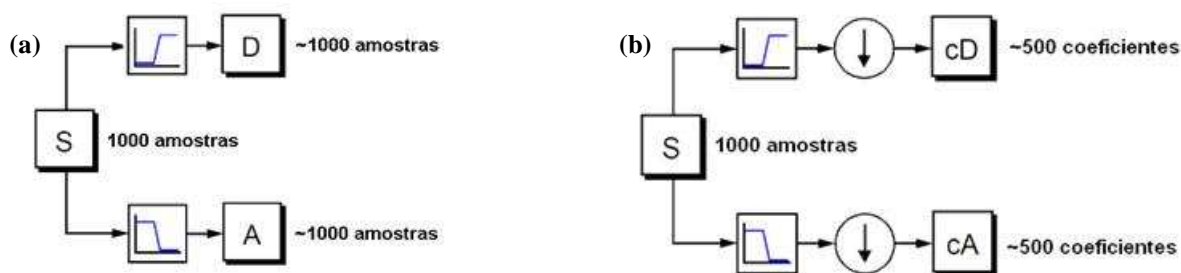


Figura 4. Sinal digital aplicado a: (a) processo de filtragem; (b) decomposição wavelet (Pagodinas, 2002).

O processo de decomposição pode ser iterativo, com sucessivas aproximações sendo decompostas novamente em aproximações e detalhes, por meio da árvore de decomposição wavelet, mostrado na Fig. (5). O número de níveis é definido baseado na natureza do sinal (Pagodinas, 2002).

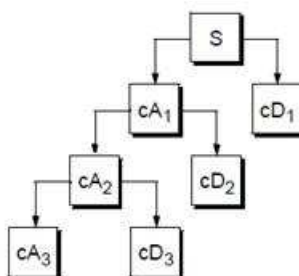


Figura 5. Decomposição multi-nível por wavelets.

As wavelets Daubechies são uma família de wavelets ortogonais definindo uma transformada wavelet discreta. A cada classe da wavelet, existe uma função de escala (também chamada de wavelet mãe) que gera uma análise de multiresolução ortogonal.

Wavelets Daubechies são amplamente utilizados na solução de uma ampla gama de problemas, por exemplo, propriedades de auto-similaridade de um sinal ou problemas fractal, descontinuidades do sinal, etc. Os nomes da família Daubechies são escritas dbN, onde N é a ordem, e db a representação do nome da wavelet (Pagodinas, 2002).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Confeção dos Corpos de Prova

Foram utilizados 03 corpos de prova de laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibra de carbono, nas dimensões 300 mm x 300 mm x 1,34 mm, com duas camadas de pré-impregnados e com a direção das fibras paralela à direção de laminação do alumínio.

Para confecção dos corpos de prova, foram utilizados:

- Chapas de alumínio com dimensões de 300 mm x 300 mm x 0,5 mm, (composição: Al- 99,00%, Cu- 0,05%, Fe/Si<1,00%, Mg<1,00%, Mn-0,05%, Ti- 0,00%, Zn- 0,10%, Cr- 0,00%, outros- 0,00 a 0,15%);
- Lâminas de prepreg de fibra de carbono/epóxi unidirecional (UD) Fibredux 920CX-TS-5-42 ®, com dimensões de 300 mm x 300 mm x 0,17 mm, fabricadas pela Ciba-Geigy Corporation.

Na Tab. (2) são apresentadas as configurações dos corpos de prova.

Tabela 2. Configuração dos corpos de prova.

LFM 2/1	TIPO DE DEFEITO	CONFIGURAÇÃO DO PREPREG
CP1SD	Sem defeito	0°/0°
CP1F	Fratura de fibra	0°/0°
CP1D	Delaminação	0°/0°

A fratura de fibras foi simulada pelo corte e remoção do prepreg, e a delaminação pela adição de *spray* de teflon®. Após empilhamento, os CPs foram curados em autoclave. A localização dos defeitos inseridos podem ser visualizados na Fig. (6).

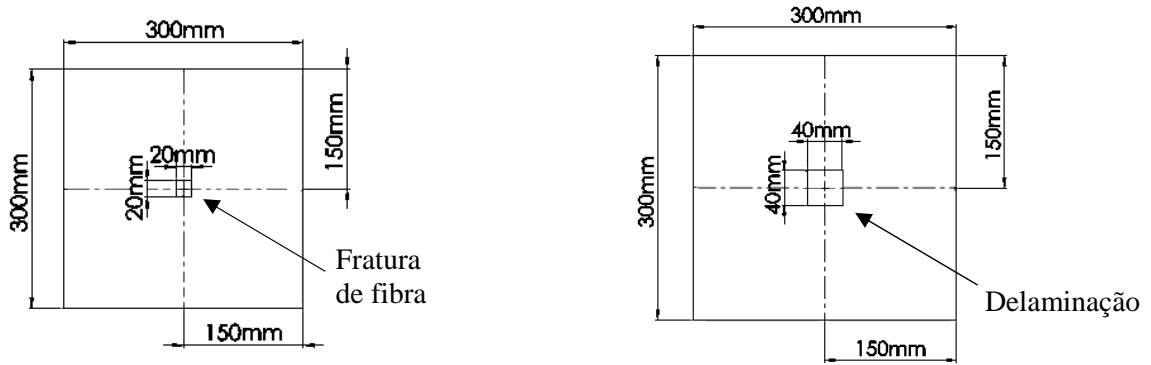


Figura 6. Dimensões e posicionamento dos defeitos nos corpos de prova: (a) fratura de fibra; (b) delaminação.

3.2. Ensaios Ultrassônicos

Os ensaios não destrutivos ultrassônicos foram realizados na configuração pulso eco de incidência normal por imersão, utilizando transdutor Olympus Panametrics, modelo NDT V-326, com diâmetro de 0,375'' e frequência nominal 5 MHz. O aparelho de ultrassom da Krautkrämer, modelo USM 25, foi responsável apenas pela geração e recepção dos pulsos ultrassônicos. Os sinais analógicos do aparelho de ultrassom foram transferidos a um osciloscópio Tektronix, modelo TDS2024B, e amostrados a uma frequência de 500 MHz, possibilitando uma maior resolução nos sinais ultrassônicos. A Fig. (8) ilustra a configuração experimental utilizada no ensaio por imersão.

O ensaio por imersão foi utilizado como alternativa para a dificuldade encontrada na inspeção ultrassônica por contato para defeitos próximos à superfície em compósitos, visto que as reflexões das discontinuidades se encontram normalmente dentro do campo próximo.

Foram construídos dois suportes em nylon®, com dois ímãs permanentes terra-rara cada, de forma a permitir a concentricidade entre ambos, quando dispostos em lados opostos do corpo de prova, conforme ilustrado na Fig. (7), e facilitar a fixação, sem desvios angulares por conta do operador, e a estabilidade do espaçamento entre o transdutor e o compósito. Estabeleceu-se uma coluna d'água de 49,5 mm, a fim de reduzir a influência do campo próximo nos sinais adquiridos e concentrar maior energia na região de inspeção.

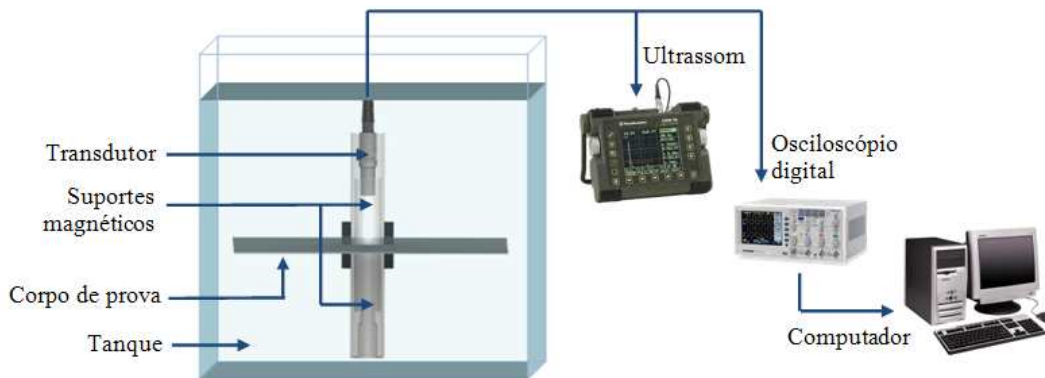


Figura 7. Configuração experimental utilizada nos ensaios ultrassônicos por imersão.

Foi realizada varredura em malhas de 9 x 9 pontos, espaçados 5 mm entre si em região com delaminação, e 2.5 mm em regiões sem defeito e com fratura de fibras, onde cada ponto/sinal possui 2500 amostras de amplitude. Como a informação relevante para identificar a existência de danos se concentra nos ecos de fundo, os sinais foram amostrados no osciloscópio na faixa de tempo respectiva. Logo após, transferidos para computador para realizar processamento digital de sinais e extrair parâmetros importantes na detecção das discontinuidades, visto que, no domínio do tempo, verifica-se a dificuldade de identificar padrões para cada configuração: sem defeito, com fratura de fibra e delaminação. Desta forma, não se conseguiria detectar os danos existentes no compósito.

3.3. Processamento Digital de Sinais

A primeira etapa de processamento realizou a normalização de todos os sinais adquiridos.

3.3.1. Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier foi aplicada nos sinais adquiridos, de forma a realizar a análise espectral e verificar a possibilidade de identificar características mais evidentes em cada configuração de sinal. Os espectros foram restritos ao intervalo de 0 a 15 MHz, visto que a energia se concentra principalmente nesta banda.

Através da plotagem de histogramas entre sinais de diferentes tipos e considerando as amplitudes de uma mesma frequência, foram identificadas frequências críticas para caracterizar as três configurações: sem defeito, com delaminação e com fratura de fibras.

3.3.2. Transformada Discreta Wavelet

O processamento através da Transformada Discreta Wavelet foi realizado nos sinais obtidos em modo pulso-eco, visando encontrar detalhes ou aproximações em que fosse possível identificar mais facilmente padrões para os sinais relativos à região sem defeito, com delaminação e com fratura de fibra.

Em cada nível de decomposição, a banda de frequência dos coeficientes de detalhe e aproximação é dividida em duas. Foi desenvolvida uma rotina em Matlab® para realizar decomposição multinível em 5 estágios utilizando a wavelet db9 da família Daubechies, visto que neste estágio a banda de frequência de análise (0 a 8.0625 MHz) permitiu a obtenção de resultados, nos quais as diferenças entre os sinais de classes distintas se evidenciaram.

O momento de terceira ordem da diferença entre os sinais, tendo como base o sinal sem defeito, é uma característica discriminante dos sinais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Sinais no Domínio do Tempo

Para os sinais amostrados em uma faixa de tempo selecionada, percebe-se diferença evidente entre o sinal de fratura de fibra com os demais. No entanto, os sinais sem defeito e com delaminação apresentam bastante similaridade no domínio do tempo, como pode ser observado na Fig. (8).

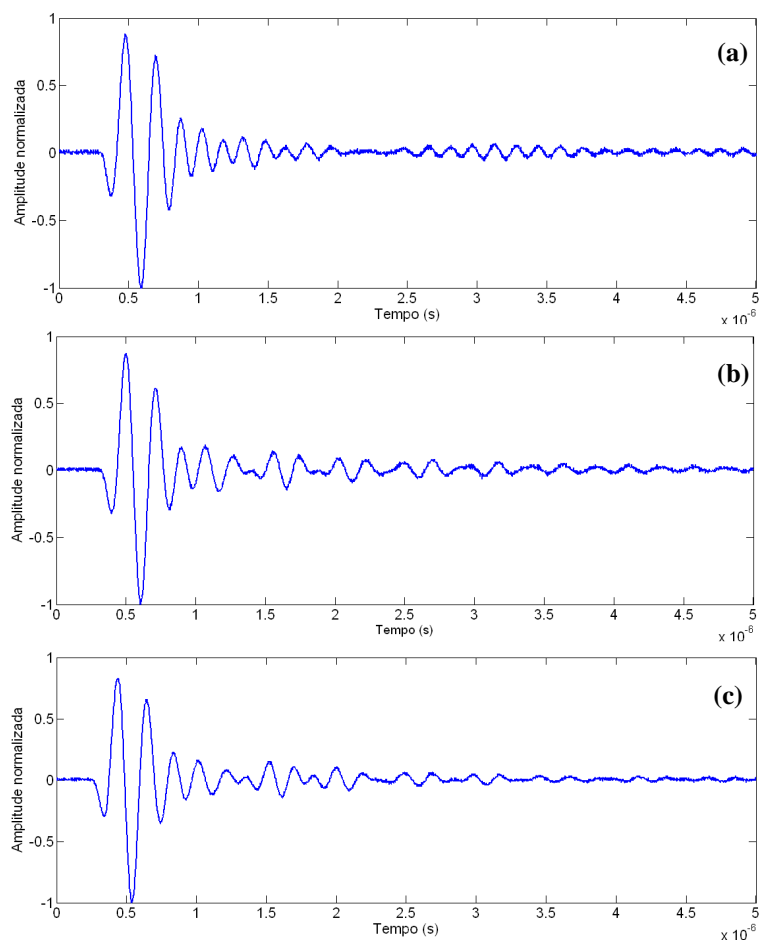


Figura 8. Sinais no domínio do tempo referentes ao corpo de prova: (a) com fratura de fibra; (b) delaminação; (c) sem defeito.

4.2. Transformada Discreta de Fourier

Podem ser visualizadas na Fig. (9) os padrões de espectros referentes aos sinais sem defeito, com fratura de fibra e com delaminação, onde os marcadores pontuais indicam as principais diferenças relativas observadas a partir da plotagem dos histogramas de amplitude de espectro para cada frequência do intervalo de 0 a 15 MHz, conforme os apresentados na Fig. (10).

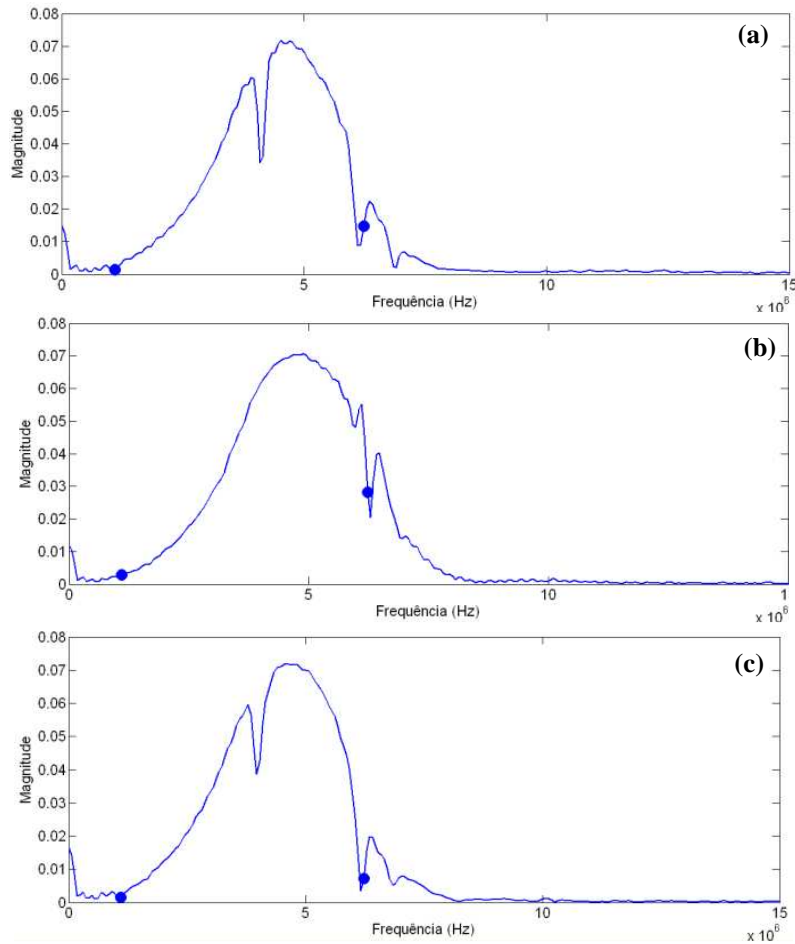
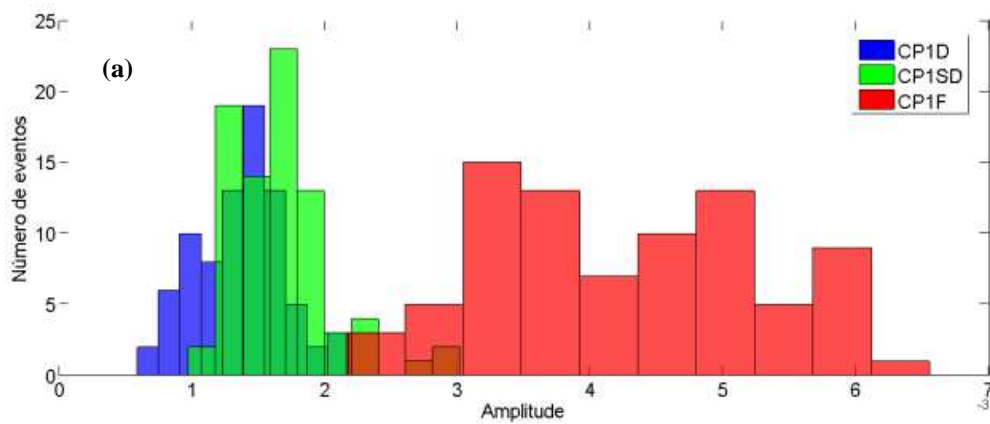


Figura 9. Espectros de frequência referentes a sinal: (a) sem defeito; (b) com fratura de fibra; (c) com delaminação.



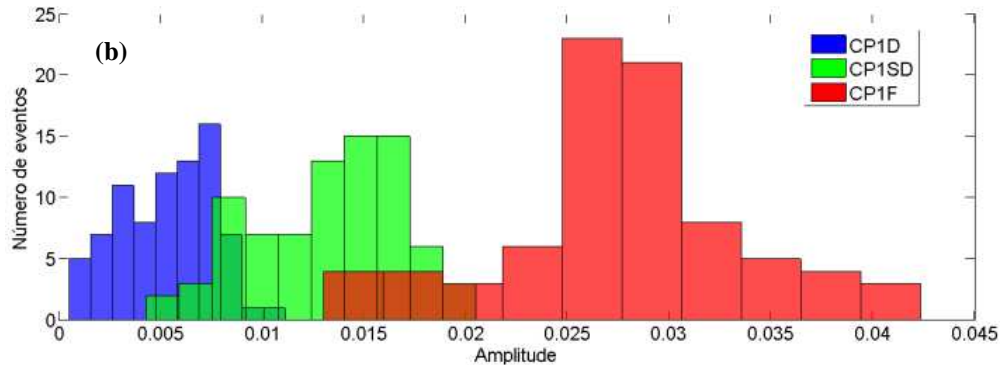


Figura 10. Histogramas dos espectros das três configurações de sinais relativos às amplitudes das frequências: (a) 1.0989 MHz; e (b) 6.2271 MHz.

Na Fig. (10) são observadas duas frequências discriminantes, selecionadas para classificação dos padrões de sinais ultrassônicos, visto que é verificada a distinção entre as três regiões do corpo de prova.

De posse das amplitudes relativas à frequência de 6.2271 MHz, implementou-se um classificador linear capaz de identificar automaticamente o sinal de entrada quanto a existência e tipo de defeito. Os resultados mostram que:

- Para sinais referentes a regiões de delaminação, houve acerto de 81.48%;
- Para sinais referentes a regiões sem defeito, houve acerto de 90.12%;
- Para sinais referentes a regiões com fratura de fibras, houve acerto de 90.12 %.

O gráfico da Fig. (11) ilustra os resultados da classificação para as malhas de inspeção com 9 x 9 pontos de coordenadas, onde a cor amarela indica erro e azul acerto.

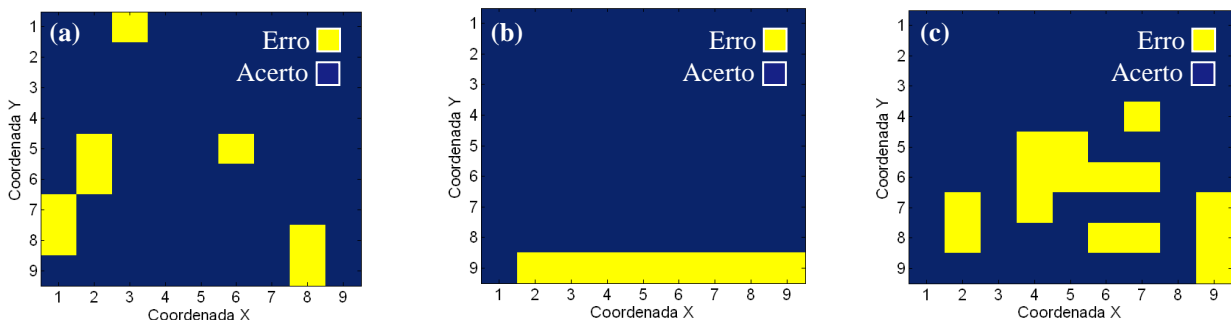


Figura 11. Diagramas ilustrativos dos resultados do classificador através de Transformada de Fourier para região: (a) sem defeito; (b) com fratura de fibra; e (c) com delaminação.

Para os sinais adquiridos no CP1SD e CP1F, os erros estão mais concentrados nas bordas, visto que existe relativa incerteza do posicionamento do defeito no corpo de prova; já para os sinais do CP1D, os erros estão mais espalhados em toda a área, pois essa assinatura através da Transformada de Fourier é mais difícil de ser identificada.

A matriz de confusão para a classificação através da Transformada de Fourier é apresentada na Tab. (3).

Tabela 3. Matriz de Confusão do Classificador Linear através de Transformada de Fourier.

	SEM DEFEITO	DELAMINAÇÃO	FRATURA
SEM DEFEITO	90.1%	6.2%	3.7%
DELAMINAÇÃO	18.5%	81.5%	0.0%
FRATURA	9.9%	0.0%	90.1%

4.3. Transformada Discreta Wavelet

Foram realizadas decomposições a 5 níveis em todos os sinais ultrassônicos das malhas. Aos coeficientes obtidos na Transformada Wavelet, calculou-se o ponto máximo momento estatístico de terceira ordem. Este parâmetro foi avaliado como relevante para a classificação dos sinais em padrões. A Fig. (12) mostra um histograma dos momentos de 3ª ordem da diferença entre os sinais, tendo como padrão uma malha 9 x 9 de sinais referente a região sem defeito. A Fig. (13) ilustra os resultados da classificação através da Transformada Wavelet.

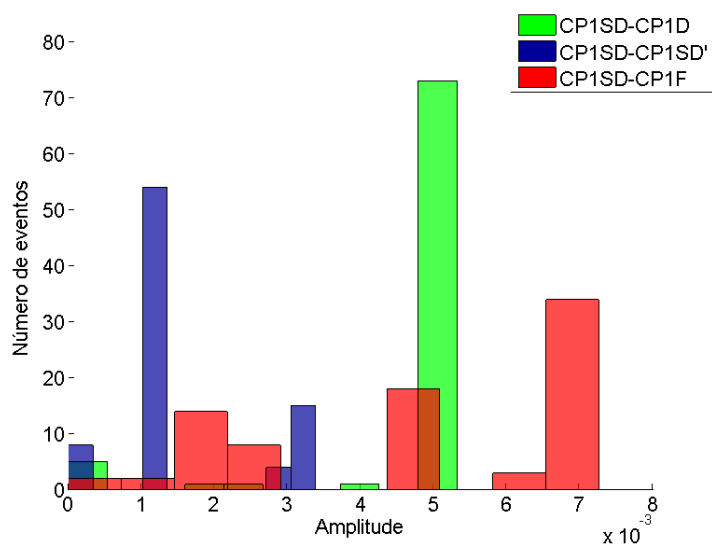


Figura 12. Histograma dos máximos dos momentos de 3ª ordem da diferença dos sinais: CP1SD-CP1D, CP1SD-CP1SD', CP1SD-CP1F.

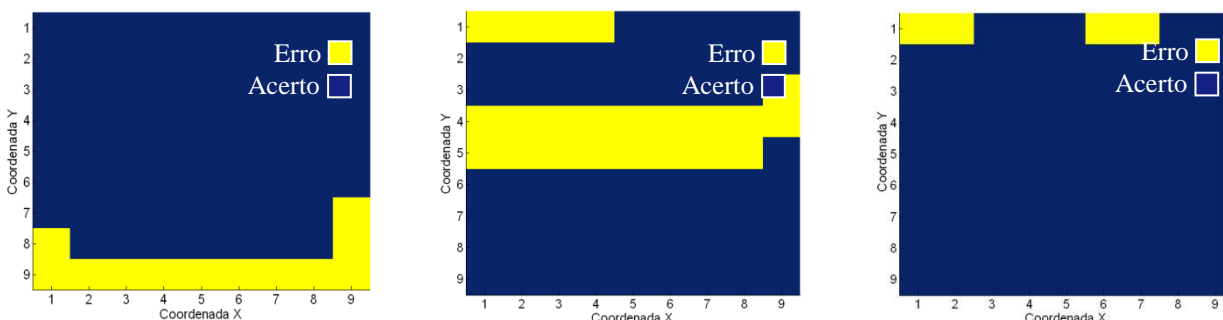


Figura 13. Diagramas ilustrativos dos resultados do classificador através de Transformada Wavelet para região: (a) sem defeito; (b) com fratura de fibra; e (c) com delaminação.

Para os sinais de CP1SD e CP1D, os erros estão mais concentrados nas bordas, já que existe relativa incerteza do posicionamento do defeito no corpo de prova; para os sinais de CP1F, os erros estão mais espalhados em uma faixa central, pois essa assinatura através da característica extraída é mais difícil de ser identificada.

A matriz de confusão para a classificação através da Transformada Wavelet é apresentada na Tab. (4).

Tabela 4. Matriz de Confusão do Classificador Linear através de Transformada Wavelet.

	SEM DEFEITO	DELAMINAÇÃO	FRATURA
SEM DEFEITO	72.8%	22.2%	5.0%
DELAMINAÇÃO	2.5%	95.0%	2.5%
FRATURA	14.8%	0.0%	85.2%

5. CONCLUSÕES

A utilização do ensaio não destrutivo ultrassônico convencional, através do método pulso-eco por imersão, aplicado a técnicas de processamento digital de sinais, apresentou resultados satisfatórios na detecção de danos, como delaminação e fratura de fibras, em compósitos laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibra de carbono.

O desenvolvimento de rotinas computacionais para aplicação da FFT e da Transformada Wavelet permitiu a análise e interpretação mais facilitada para a classificação de padrões para regiões relativas aos três tipos de configuração nos corpos de prova.

6. AGRADECIMENTOS

À FAPESB, pelo apoio financeiro; ao IFBA, pela infraestrutura; ao GPEND, pelo apoio técnico.

7. REFERÊNCIAS

- Beber, A.J., 2003, “Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono”, Tese de Doutorado em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre-RS, Brasil;
- Chen, C., 2001, “Digital Signal Processing: Spectral Computation and Filter Design”, Oxford University Press, New York;
- Diniz, P. et. al., 2004, Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas, Bookman, Porto Alegre-RS;
- Farias, C.T.T., 2006, “Utilização das Ondas Ultra-sônicas de Lamb na Inspeção de Materiais Compósitos Laminados Fibra-Metal”, Dissertação de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil;
- He, P. and Zheng, J., 2001, “Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using Both Transmitted and Reflected Pulses”, Ultrasonics, Vol. 39, pp. 27-32;
- Kazys, R. and Svilainis, L., 1997, “Ultrasonic Detection and Characterization of Delaminations in Thin Composite Plates Using Signal Processing Techniques”, Ultrasonics, Vol. 35, pp. 367-383;
- Kruger, S.E., 1996, “Análise Espectral de Ecos e Sinal Retroespalhado Ultra-Sônicos Aplicados à Detecção de Danos por Hidrogênio em Aço”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil;
- Misiti, M. et. al., 2002, Wavelet Toolbox for Use with MATLAB®. User’s Guide, version 2, The MathWorks;
- Montes, R.M., 1998, “Desenvolvimento de Compósitos Laminados da Liga de Alumínio ALCLAD 2024-T3 com Epóxi Reforçado por Fibras de Vidro e Aramida”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil;
- Nanekar, P.P. and Shah, B.K., 2003, “Characterization of Material Properties by Ultrasonics”, National Seminar on Non-destructive Evaluation, NDE, Trivandrum, India;
- Oppenheim, A. et. al., 1996, Signals and Systems, Prentice-Hall Signal Processing Series;
- Pagodinas, D., 2002, “Ultrasonic Signal Processing Methods for Detection of Defects in Composite Materials”, Ultrasonics;
- Romariz, L.A., 2008, “Dano em Placas Laminadas devido ao Impacto a Baixas Velocidades”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, USP, São Paulo-SP, Brasil;
- Vlot, A. and Gunnink, J.W., 2001, Fibre Metal Laminates – an introduction, Kluwer Academic Publishers.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF STRUCTURAL INTEGRITY OF COMPOSITE LAMINATED PLATES ALUMINUM EPOXY REINFORCED BY CARBON FIBER WITH AID OF DIGITAL TECHNIQUES FOR ULTRASONIC SIGNALS PROCESSING

Elmo Alberto Teixeira Borges Junior, elmo.alberto@ifba.edu.br¹

Igor Souza Ribeiro, igorsr@ifba.edu.br¹

Eduardo Furtado Simas Filho, esimas@ifba.edu.br¹

Cláudia Teresa Teles Farias, cfarias@ifba.edu.br¹

Lílian Aguiar Sena da Silva, lilian.asena@ifba.edu.br¹

Teodorio Arão Santos de Oliveira, teodorio@ifba.edu.br¹

¹Federal Institute of Bahia - IFBA, Emídio dos Santos Street.

Abstract. *The technological updating required by the aerospace industry has been contributing to the development of new materials. The fiber metals laminates composite (FML) have a sandwich structure, with thin metal sheets and layers of pre-impregnated, combining low density, corrosion resistance and excellent mechanical properties. However, a variety of deformation modes can lead to failure of these composites. This study aimed to evaluate the efficiency of an ultrasonic non-destructive testing echo pulse setup in immersion, to detect and size the damage type of fiber fracture and delamination in composite laminate of aluminum and epoxy reinforced carbon fiber, applying techniques of digital signal processing. The results indicate that the analysis through the Wavelet Transform and Fourier can be a very important tool to assist in the detection of discontinuities in these highly heterogeneous and anisotropic materials.*

Keywords: *fiber-metal laminate composite, non-destructive ultrasonic testing, digital signal processing, structural integrity.*