

## Metodologias avançadas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) em materiais compósitos: uma revisão bibliográfica

Bruno Dorneles de Castro, Juan Carlos Campos Rubio

**Resumo:** O uso de materiais compósitos tem crescido fortemente ao longo das últimas décadas, principalmente na indústria da aeronáutica, resultando em reduções no peso e na densidade das aeronaves. Assim, a qualidade na inspeção desses materiais é de suma importância para manter sua integridade estrutural e seu desempenho mecânico esperado, evitando falhas prematuras, causadas por agentes como pedras de granizo e colisão de pequenas aves. O uso de metodologias de monitoramento de integridade estrutural (Structural Health Monitoring – SHM) tem sido largamente estudado, uma vez que possibilita a identificação, a extensão e a quantificação de danos, sem que haja a necessidade de interferir negativamente nas propriedades mecânicas dos compósitos monitorados. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre as principais metodologias e técnicas avançadas utilizadas no SHM de materiais compósitos, aplicadas nos últimos anos. Por meio da pesquisa, percebe-se que fatores como os materiais constituintes dos compósitos e suas propriedades são determinantes no sucesso do emprego de um determinado método de SHM. Além disso, o custo empregado na adoção de uma determinada técnica de SHM deve ser avaliado cuidadosamente, em função dos objetivos definidos para a realização do monitoramento.

**Palavras chave:** Materiais Compósitos, Monitoramento de Integridade Estrutural, Ensaio não destrutivo.

## Advanced methodologies of Structural Health Monitoring (SHM) in composite materials: a review

**Abstract:** The use of composite materials has grown strongly over the last decades, especially in the aeronautics industry, resulting in reductions in aircraft weight and density. Thus, quality inspection of these materials is very important to maintain their structural integrity and expected mechanical performance, avoiding premature failures caused by agents such as hailstones and small bird collision. The use of Structural Health Monitoring (SHM) methodologies has been widely studied and enables the identification, extent and quantification of damage without a negative interference in the mechanical properties of the monitored composites. This study aims to perform a review on the main methodologies and advanced techniques used in SHM composite materials, applied in recent years. From this research, it is clear that factors such as the composite constituent materials and their properties are determinant in the success of the use of a particular SHM method. In addition, the cost of adopting a particular SHM technique should be carefully evaluated, considering the objectives of the monitoring process.

**Key-words:** Composite materials, Structural Health Monitoring, Non-Destructive Testing

### 1. Introdução

As transformações mercadológicas vivenciadas nos últimos anos levaram a um aumento na competitividade entre as empresas nos mais variados setores industriais. Dessa forma, torna-se cada vez mais imprescindível para a satisfação do cliente, garantir que fatores, como qualidade, confiabilidade e custo sejam traduzidos em agregação de valor ao produto. Dentro

desse contexto, o uso de materiais compósitos poliméricos tem ganhado destaque em diversos setores, uma vez que possibilita ganhos em termos de combinação de propriedades de diferentes naturezas, sendo capazes de oferecer menor peso, menor densidade e manter propriedades mecânicas relevantes como rigidez e resistência a diferentes esforços (YANG et al., 2013).

Com relação às principais preocupações no emprego de materiais compósitos na manufatura de produtos e máquinas em geral, pode-se citar a integridade estrutural desses materiais durante sua aplicação. De acordo com a magnitude de tensão imposta ao material compósito, diversos tipos de danos podem ser ocasionados. A Figura 1 mostra a evolução de um dano em uma estrutura de um compósito laminado, que esteja exposta a constantes solicitações mecânicas (fadiga), durante sua vida útil. No início (estágio I), há uma rápida perda de rigidez, que resulta em trincas e fraturas na matriz. Num estágio posterior (estágio II), essa perda de rigidez acontece mais lentamente, com redução significativa de rigidez e surgimentos de danos como descolamento entre matriz e fibras e delaminações. Num terceiro momento (estágio III), a rigidez cai de forma imediata e a falha final do compósito é verificada, com a fratura das fibras de reforço (DUCHENE et al., 2018).

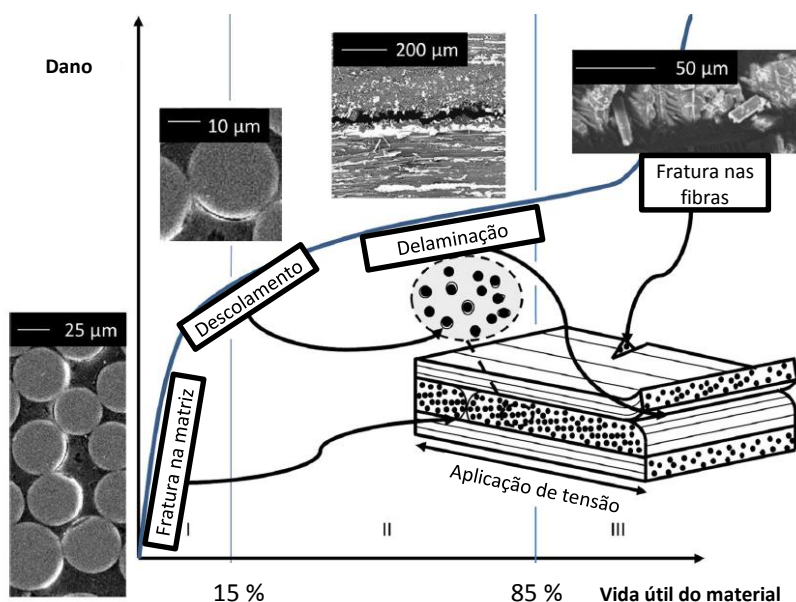


Figura 1 – Evolução do dano em materiais compósitos com fadiga ao longo da vida útil (Fonte: Adaptado de DUCHENE et al., 2018)

Diante da necessidade da correta inspeção estrutural, diversas técnicas de monitoramento de integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM) tem sido desenvolvidas ao longo dos últimos anos. Um dos setores industriais que mais tem utilizado as tecnologias de SHM é a aeronáutica. Inspeções diárias são procedimentos necessários para a manutenção das aeronaves, e representam um alto custo. No contexto dos materiais compósitos, muitos impactos ocasionados por objetos, pequenas aves ou pedras de granizo causam danos pouco visíveis, que salientam a necessidade de métodos robustos e confiáveis de SHM. Dessa forma, a influência de fatores, como a orientação e a geometria do reforço dos compósitos tem sido constantemente investigados (DE MEDEIROS et al., 2018).

Existem diversas técnicas de SHM, que podem variar conforme o fator de análise, como no objetivo (detecção de dano, localização do dano, identificação do dano, quantificação da

gravidade do dano ou prognóstico da vida útil remanescente da estrutura) e na forma de monitoramento (intrusivas, que são embutidas no interior do produto, ou externas, instrumentadas na superfície externa do produto). Nesse contexto, salienta-se também a importância do uso de testes não destrutivos (*Non-Destructive Testing – NDT*), que não culminem na destruição do produto, e que possibilitem a avaliação de início e da progressão de um determinado dano no material. A tabela 1 mostra os principais tipos de NDT usados como SHM externo e algumas das técnicas empregadas conforme cada tipo de teste (TULOUP et al., 2019, SELVA et al., 2013).

<b>Tipo de teste não destrutivo</b>	<b>Exemplos de técnicas empregadas</b>
Teste radiográfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Radiografia convencional (partes usuais da espessura);</li> <li>– Radiografia de baixa voltagem (partes finas);</li> <li>– Radiografia de raios gama (partes grossas);</li> <li>– Método de radiografia computadorizada por raios X;</li> <li>– Raios-X reforçados com corante penetrante;</li> <li>– Método de tomografia computadorizada por raios X;</li> <li>– Método de radiografia digital.</li> </ul>
Teste eletromagnético	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reflexão de onda milimétrica;</li> <li>– Vazamento de fluxo magnético (MFL);</li> <li>– Teste por correntes parasitas.</li> </ul>
Teste de emissão acústica (AE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sensores de AE piezoelétricos externos ressonantes.</li> </ul>
Teste de termografia por infravermelho (IRT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– IRT passivo: a câmera infravermelha detecta a energia térmica emitido pela parte testada;</li> <li>– IRT ativo: há uma energia térmica transferida para a parte testada.</li> </ul>
Teste óptico	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Digitalização Óptica por Transmissão (OTS);</li> <li>– Correlação de Imagem Digital (DIC);</li> <li>– Shearografia;</li> <li>– Holografia (laser pulsado de mudança de fase, Interferometria de Padrão de Speckle Eletrônico (ESPI));</li> <li>– Interferometria do Padrão Speckle Digital (DSPI);</li> <li>– Tomografia por Coerência Óptica (OCT);</li> <li>– Fibras Óticas (OF).</li> </ul>
Teste ultrassônico (US)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ondas guiadas (superfície / placa);</li> <li>– Ondas de volume;</li> <li>– Espectroscopia em Terahertz (THZ).</li> </ul>
Teste de emissão acústica e ultrassom (Acousto-ultrasonic testing: A-US)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sistema externo A-US (transdutor para excitação e sensores AE para detecção);</li> <li>– A-US: transdutores externos (discos PZT) usados tanto em modo ativo (transdutores US) e modo passivo (AE sensores).</li> </ul>
Teste elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Método de Impedância Eletromecânica (EMI) usando sensores ativos piezoelétricos com sensoriamento automático (PWAS);</li> <li>– Tomografia por impedância elétrica (EIT).</li> </ul>
Teste de vibração	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Medição com vibrômetro a laser (LV) e excitação com agitador equipado com um ferrão (<i>Stinger</i>), um transdutor de força e uma mola;</li> <li>– Medição com LV e excitação com agitador ou alto-falante.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Tuloup et al. (2019)

Tabela 1 – Técnicas de NDT para uso externo em SHM

Conforme Shi et al. (2014), existem duas abordagens gerais para o monitoramento da integridade estrutural. Uma delas é a abordagem global, em que as mudanças nas propriedades vibracionais de uma estrutura causadas por danos são medidas e analisadas em um esforço para detectar e caracterizar o dano. A outra é uma abordagem local, em que a detecção e a caracterização do estado de dano de estruturas de compósitos é frequentemente realizada usando a propagação de ondas ultrassônicas nas estruturas de compósitos.

De Medeiros et al. (2018) também enfatizam essas abordagens. Segundo os autores, as metodologias para caracterização de danos podem ser classificadas em quatro níveis: identificação (detecção), localização, extensão do dano e resistência residual. Para a identificação do dano, técnicas baseadas em vibração têm tido destaque, principalmente no campo da engenharia aeronáutica. Dentre alguns dos métodos experimentais para estabelecer características dinâmicas de estruturas vibratórias lineares, cita-se a matriz de funções de resposta ao impulso, funções de resposta de frequência complexas (FRFs) e características modais (frequências naturais, amortecimento modal e formas de modo). Em relação à localização e extensão dos danos, as técnicas ópticas têm sido amplamente usadas, devido à progressos em arranjos de dispositivos de carga acoplada (Charge-couple devices) e CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) integrados à câmera, com alta resolução e pequeno tamanho. Por fim, a resistência residual, que geralmente tem sido estudada pela determinação do efeito de diferentes energias de impacto sobre sua resistência residual. São comuns os testes de compressão após impacto (CAI) para estruturas danificadas por impacto de baixa energia. Esses testes tem como objetivo avaliar a capacidade de um elemento estrutural continuar desempenhando suas funções após determinado um impacto, como o caso de vigas projetadas para suportar momentos de flexão, cuja necessidade consiste em avaliar as suas propriedades de flexão residuais.

A partir desse contexto, este trabalho tem como objetivo relatar e discutir as principais metodologias e técnicas avançadas utilizadas no monitoramento de integridade estrutural de materiais compósitos, nos últimos anos. O trabalho se justifica pela necessidade de conhecimento dessas novas metodologias, uma vez que o ambiente industrial tenderá, cada vez mais, a se utilizar dessas técnicas, com o intuito de diminuir custos e aumentar a qualidade e a eficiência de seus processos e de seus produtos.

## **2. Metodologia de pesquisa**

O presente trabalho foi caracterizado como uma pesquisa bibliográfica, com base em artigos científicos publicados nos últimos anos, em periódicos altamente qualificados no que se refere ao estudo de metodologias de SHM.

A descrição das metodologias e seus principais pontos de destaque foram relatados, com o intuito de auxiliar na escolha da técnica mais adequada, para uma determinada situação.

## **3. Resultados e discussões**

### **3.1. Testes radiográficos**

A radiografia convencional consiste no uso de um feixe de raios-X penetrante para escanear a estrutura interna de materiais compósitos. Uma projeção do feixe atenuado em um filme sensível a raios X ou um escaneamento digital forma uma imagem em 2D, chamada de radiografia. Ela representa uma cartografia de atenuação de raios-X causada por mudanças na densidade eletrônica ao longo da direção do feixe. A radiografia pode ser usada para detectar danos em mesoescala e em macroescala em laminados compósitos, como

rachaduras interlaminares e delaminação, e permite principalmente a detecção de fissuras que evoluem no plano transversal à direção do feixe (DUCHENE et al., 2018).

Guild et al. (2006) investigaram a existência de rachaduras intralaminares em compósitos de epóxi reforçados com fibras de carbono, por meio de radiografias (raios-X). Os autores realizaram ensaios de tração quase-estáticos (velocidade de 0,5 mm/min) e testes de fadiga, uma forma de onda sinusoidal a uma frequência de 10 Hz com uma razão R entre tensões de 0,1. Os corpos de prova foram entalhados e o comprimento da fissura em função do número do ciclo foi monitorado usando radiografias, com o uso de um corante penetrante (*Dye-penetrant enhanced X-radiography*). Foram verificadas rachaduras tanto próximas quanto longe aos entalhes, como mostra a Figura 2, com radiografias em compósitos  $[0_2/75_4]_s$ , numa progressão da taxa de deformação em 0,1%.

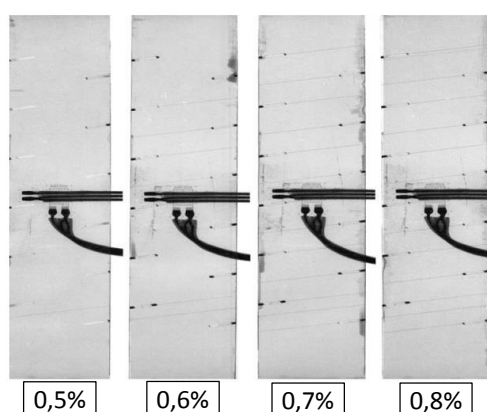


Figura 2 – Radiografias com o uso de corante penetrante em compósitos de Epóxi e Fibras de Carbono, evidenciando o desenvolvimento de rachaduras com o aumento da deformação (Fonte: GUILD et al., 2006)

### 3.2 Testes eletromagnéticos

Com relação à utilização de testes eletromagnéticos no SHM, Li, Z. et al. (2018) forneceram uma visão abrangente das técnicas de micro-ondas atualmente disponíveis, destinadas à SHM em compósitos poliméricos com fibra de carbono. Os autores enfatizam, inicialmente, a influência das propriedades eletromagnéticas dos compósitos de fibra de carbono na eficiência do teste. A alta condutividade das fibras de carbono faz com que elas se comportem como metais, que refletem a maior parte da energia do sinal incidente. A resina epóxi, por outro lado, é dielétrica. O fator de perda é insignificante (pouca energia é absorvida no material) e ele é considerado transparente à radiação de micro-ondas. No trabalho, foram caracterizados os métodos de micro-ondas de autodetecção, de indução a curta distância, de ressonância a curta distância, de detecção a longa distância e a combinação destes com outros NDT.

Yang et al. (2013) analisaram o SHM em compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRPs), usando uma onda milimétrica de 65-67 GHz. O dano de impacto foi produzido por energias de impacto de 3,63 J, 8,89 J e 13,21 J, respectivamente. Os coeficientes de reflexão são afetados pelo ângulo entre a direção do vetor do campo elétrico da onda eletromagnética e a direção da fibra de carbono na superfície da CFRP, pelo fato de os compósitos CFRP serem materiais eletricamente anisotrópicos. Os autores verificaram que quando este ângulo era 0°, os coeficientes de reflexão na superfície com e sem danos eram facilmente discernidos. Consequentemente, a imagem formada por meio das amostras de CFRP, incluindo o dano por impacto, foi conduzida utilizando alterações do coeficiente de



reflexão. Utilizou-se a técnica de processamento de imagens de detecção de bordas, para a obtenção de uma imagem mais próxima à natural. A magnitude dos danos causados pela produção de energia de impacto também foram bem distinguidos através das imagens. A Figura 3 mostra uma das imagens gerada, com o uso de uma Antena de Chifre (*Horn Antenna*), do compósito testado pela energia de impacto de 13,21 J, com e sem a técnica de detecção de bordas.

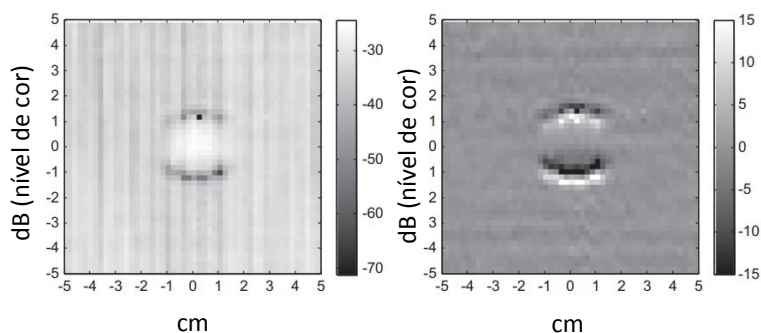


Figura 3 – Imagens geradas via ondas milimétricas dos (a) compósitos CFRP e (b) imagens obtidas com o uso da técnica de detecção de bordas (Fonte: YANG et al., 2013)

### 3.3 Teste de emissão acústica

De acordo com Crivelli et al. (2015), a técnica de emissão acústica é classificada como não destrutiva e passiva, uma vez que não requer que sinais sejam emitidos (isto é, não introduz energia na estrutura) para detectar danos. Ela apenas aguarda que os sinais, originados dentro do material por algum dano ou processo de liberação de energia, sejam devidamente gravados. Isso pode ser considerada uma grande vantagem, uma vez que não exige a varredura contínua da estrutura ou o registro contínuo de dados em busca de um defeito potencial. Porém, pode também representar uma desvantagem, pois não fornece informações sobre a estrutura quando ela não está carregada, ao contrário de outros NDT (como radiografia ou ultrassom). Ela baseia-se na observação de que os materiais, quando submetidos a algum tipo de dano, liberam energia na forma de ondas elásticas curtas e transitórias na faixa de ultrassom (100-1000 kHz). Tais ondas propagam-se na estrutura através do material e de sua superfície e, eventualmente, dissipam-se devido a vários fenômenos. Estas ondas podem ser gravadas por meio de sensores apropriados, com destaque para os sensores piezoelétricos.

McCroy et al. (2015) investigaram o uso da emissão acústica para localizar e classificar o tipo de dano que ocorre em um compósito painel de fibra de carbono durante a flambagem. O dano foi localizado com base em um algoritmo de localização chamado mapeamento delta-T, e os sinais identificados como provenientes das regiões de dano foram então analisados usando três técnicas de emissão acústica: Análise de Redes Neurais Artificiais (RNA), Clusterização de Forma de Onda Não Supervisionada (UWC) e Índice de Amplitude Medido (MAR) corrigido. Os autores verificaram que a capacidade do MAR em revelar a orientação de sinais gravados ajudou bastante na identificação da região de delaminação. No entanto, as técnicas de RNA e a de UWC têm a capacidade de agrupar sinais em várias classes diferentes, o que auxilia nos casos em que vários mecanismos de danos são gerados. A Figura 4 mostra a distribuição por tempo da UWC para duas classes de sinais identificadas (*clusters*, definidos como *class 1* e *class 2*), que mostra um mecanismo de fonte AE, presente no final do teste, mais proeminente no canto superior esquerdo do painel. Os autores ressaltam que o método

de localização de mapeamento delta-T não é isento de falhas e acredita-se que vários sinais originados dos cantos foram mal definidos como sendo “originados” do centro do painel. Os clusters 1 e 2 indicaram a ocorrência de quebra de matriz e de delaminação, respectivamente.

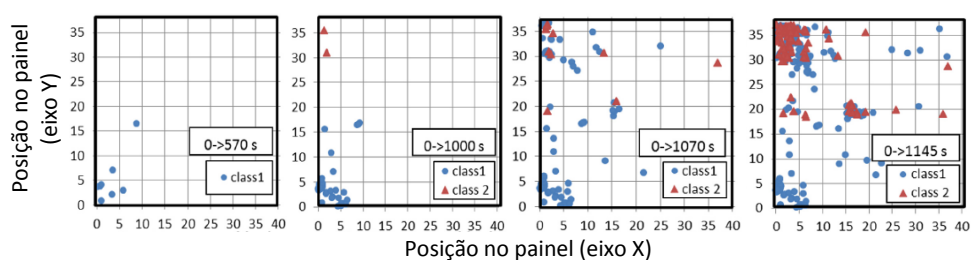


Figura 4 – Distribuição por tempo dos clusters durante os testes (Fonte: McCrory et al., 2015)

### 3.4 Testes de Termografia por Infravermelho

Quando há uma carga mecânica cíclica em um material compósito, ocorre uma variação em sua temperatura. A partir desse pressuposto, o uso da técnica de termografia por infravermelho (IRT) se torna uma solução eficaz e econômica de NDT. Ela pode ser aplicada tanto no modo passivo como no modo ativo. No modo passivo, os materiais estão em uma temperatura diferente em relação aos materiais circundantes. Já no modo ativo, precisa-se de um estímulo externo para induzir uma variação de temperatura superficial. A termografia passiva tem um caráter qualitativo, enquanto que a termografia ativa permite que análises qualitativas e quantitativas sejam realizadas (MUC et al., 2018).

O trabalho de Stawiarski (2018) aplicou o método de propagação de ondas Lamb e a termografia por infravermelho para observar a evolução do dano à fadiga numa placa de compósitos de epóxi e fibras de vidro, com um orifício elíptico no centro. A técnica ativa de medição de *pitch-catch* foi usada com base em transdutores piezoelétricos montados na superfície. A localização do atuador piezoelétrico e sensores responsáveis pela excitação e detecção da onda elástica foi escolhida com base na análise progressiva de falhas aplicada ao método dos elementos finitos. A termografia por infravermelho foi usada, uma vez que possibilita a detecção do início do dano e monitoramento permanente da estrutura, além do fato de ser direta e não requerer algoritmos e softwares complexos. A Figura 5 mostra a distribuição de temperatura em uma placa com orifício elíptico, durante um teste de fadiga.

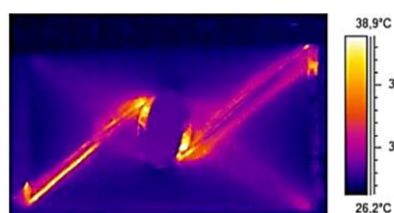


Figura 5 – Termografia por infravermelho de um compósito, em um teste de fadiga (Fonte: STAWIARSKI, 2018)

### 3.5 Testes ópticos

Com relação aos testes ópticos, um método que tem sido muito utilizado é a inspeção por shearografia, que trabalha com raio laser e é baseado no conceito de holografia óptica e Interferometria de Padrão Eletrônico Speckle (ESPI). A amostra testada é colocada sob baixa tensão gerada por aquecimento, vibrações ou por pressão, e uma mudança na tensão superficial causada pela presença de uma falha no material é detectada pela câmera

shearográfica. Por meio desse método, torna-se possível encontrar o gradiente de deformação de um material, em escalas micrométricas (RÜZEK et al., 2006). A Figura 6 mostra exemplos de shearografias em compósitos sanduíche, deformados por impacto.

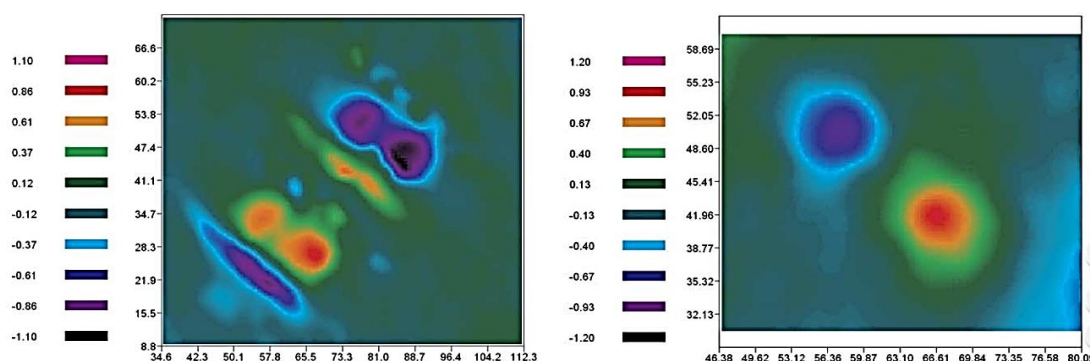


Figura 6 – Mapas de deformação em compósitos sanduíche, usando shearografia (Fonte: RÜZEK et al., 2006)

A correlação de imagem digital (DIC) é uma outra técnica óptica sem contato, que é amplamente usada para medir deformações de campo inteiro no plano (2D) ou fora do plano (3D) na superfície de uma amostra sob condições de cargas estáticas ou dinâmicas. Através dessa técnica, mapas de deformação macroscópicos podem ser obtidos. Muitos softwares que auxiliam a DIC estão cada vez mais confiáveis em relação a outras técnicas de medição de tensão (DUCHENE et al., 2018). Destaca-se também a incorporação de Sensores de Fibra Óptica (FOSs) em materiais compósitos, durante sua aplicação ou fabricação. Eles oferecem vantagens como durabilidade em ambientes hostis, imunidade a interferência eletromagnética, tamanho pequeno e maior compatibilidade com os materiais constituintes do compósito. Os dispositivos FOSs são usados para detecção de tensão e temperatura. Vários tipos de tecnologias avançadas de sensoriamento baseadas em FOS foram desenvolvidos para esse propósito, como a técnica baseada em Cavidades ópticas de Fabry-Perot, Dispersão de Brillouin e Redes de Bragg em Fibras (FBG) (VALVONA et al., 2017).

### 3.6 Testes ultrassônicos

Os testes ultrassônicos tem sido amplamente utilizados para realizar SHM, por meio de piezoelétricos. Essa técnica necessita que os transdutores piezoelétricos atuem nos modos ativo e passivo para gerar e receber ondas ultrassônicas, que podem ser ondas de volume ou placa (TULOUP et al., 2019).

Li, Y. et al. (2018) ressaltam que gargalos comuns de SHM baseado em ondas ultrassônicas guiadas (GUW) para compósitos tem incentivado o uso de nanomateriais em polímeros convencionais, trazendo uma capacidade de autopercepção das GUWs. Os autores relatam uma rede de sensoriamento embutida, formada com nanopartículas de grafeno, otimizadas e difundidas em polímeros reforçados com fibras, em que o efeito de tunelamento quântico pode ser disparado localmente quando as GUWs atravessam os compósitos. A rede de detecção difusa possibilita a aquisição de GUWs em qualquer local dos compósitos, evitando o uso de transdutores ultrassônicos convencionais que devem ser conectados externamente ou incorporados internamente aos compósitos. Com uma nanoestrutura otimizada, os compósitos funcionalizados demonstraram ser autorresponsivos a GUW de até 500 kHz. Os autores testaram GUWs em um laminado de fibra de vidro/epóxi e observaram que não há discrepância com os sinais de contrapartida obtidos com sensores piezoelétricos. O estudo destaca uma nova geração de polímeros funcionais, com capacidade de SHM, sem o uso de



sensores externos. Vantagens como a minimização de uso de cabos e fios, uma redução na penalidade de peso/volume para os compósitos originais e na degradação mecânica dos compósitos devido à intrusão de sensores, trazem um novo conceito de SHM, com os chamados “SHM livre de sensores” (*SHM sensor-free*) para compósitos. A Figura 7 ilustra o fenômeno de tunelamento que serve como base dos “SHM livre de sensores”, proposto pelos autores.

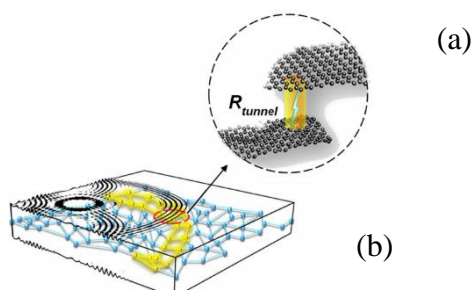


Figura 7 - Esquema de autodetecção de GUV: (a) Excitação e propagação de GUV em um compósito; (b) efeito de tunelamento acionado por GUV na rede de percolação formada por nanopartículas, levando a mudanças na resistência elétrica local (conforme manifestado pela mudança no  $R_{\text{tunnel}}$ ) (Fonte: LI, Y. et al., 2018)

### 3.7 Testes de emissão acústica e ultrassom

Uma combinação dos tipos de ensaios de emissão acústica e de caracterização ultrassônica (*acousto-ultrasonic testing*), tem sido muito estudado ao longo dos anos, ganhando destaque em termos de custo, resolução, detectabilidade e praticidade, seguindo a filosofia do SHM in situ. Dentro desse contexto, Liu et al. (2017) usaram um nanocompósito com negro de fumo (CB) e PVDF como um sensor ultrassônico de alta largura de banda. Os sensores nanocompósitos, juntamente com wafers de PZT, foram fixados em uma superfície de um painel de epóxi reforçado com fibras de vidro. Foram realizados testes de queda de peso, obtendo ondas de baixa frequência por emissão acústica e ondas de alta frequência por ultrassom. De acordo com os autores, devido às diferentes filosofias desses dois tipos de sensores (um efeito piezoelétrico pelo wafer de PZT, e um efeito piezoresistivo induzido pelo efeito de tunelamento do sensor nanocompósito desenvolvido), diferentes métodos de aquisição de sinal foram adotados. Os resultados mostraram uma boa aplicabilidade do sensor nanocompósito na identificação de danos na localização de impacto (usando ondas de baixa frequência pela técnica de emissão acústica) e avaliação quantitativa de danos (usando ondas guiadas de ultrassom de alta frequência). A Figura 8 mostra os danos detectados pela emissão acústica e pela GUVs, nos compósitos.

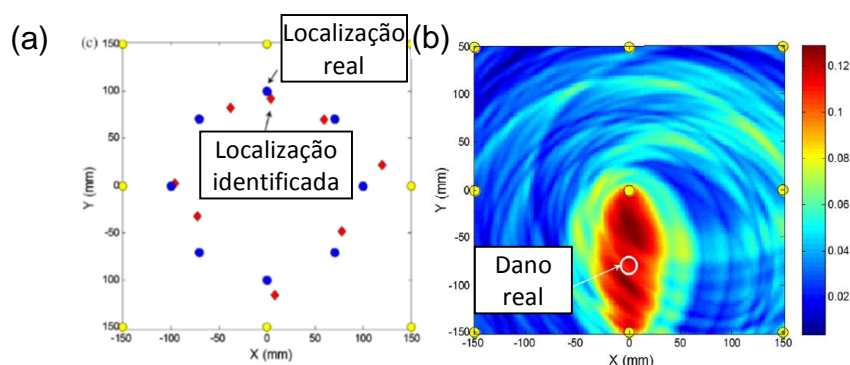


Figura 8 - Exemplo de (a) danos identificados por meio de sensores passivos via emissão acústica e de (b) um dano real mostrado por meio de GUVs (Fonte: LIU et al., 2017)

### 3.8 Testes elétricos

Com relação aos testes elétricos, Tallman et al. (2014) afirmam que a tomografia por impedância elétrica (EIT) se destaca como sendo um método de geração de imagens da distribuição de condutividade interna de um domínio através de medições de limite. Ela tem um alto potencial para SHM porque é de baixo custo, pode resolver mudanças de condutividade em termos espaciais, requer medições pouco invasivas e pode ser usada praticamente on-line.

Selva et al. (2013) apresentaram um método de SHM para detecção e localização de danos in situ em placas reforçadas com fibras de carbono, com o uso da técnica de impedância eletromecânica (EMI), que se baseia em transdutores piezoelétricos (PZTs) como sensores modais de alta frequência. Segundo os autores, a técnica de EMI possui vantagens como a capacidade de detectar danos incipientes usando transdutores piezoelétricos não intrusivos e aplicações potencialmente de baixo custo. Além disso, métricas de dano foram usadas para quantificar e detectar mudanças entre o espectro de impedância eletromecânica de estruturas intactas e danificadas. Por meio de ensaios de queda de peso, os compósitos foram impactados com 20 J em energia. O espectro de impedância resultante foi usado para construir um banco de dados composto de vários indicadores de danos usados como entradas pela rede neural probabilística (PNN). A Figura 9 mostra um exemplo de medições de impedância por um dos transdutores piezoelétricos, nos dois estados da estrutura (danificada e não danificada).

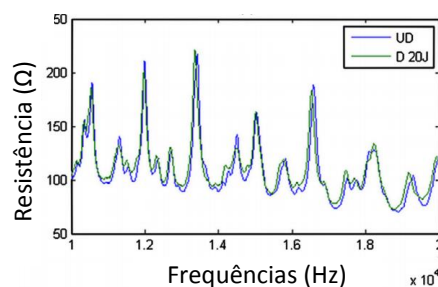


Figura 9 – Medições de impedância: estrutura não danificada, UD, e danificada, D20J (Fonte: SELVA et al., 2013)

### 3.9 Teste de vibração

De acordo com Tsogka et al. (2017), muitos sistemas de SHM baseados em vibrações são voltados para a detecção de parâmetros modais, tipicamente frequências naturais, cujas estimativas são continuamente extraídas dos dados de monitoramento, com o uso de técnicas de análise modal de saída automatizada. Os autores enfatizam o uso dessa técnica no setor da construção civil, com a proposta de um método de alongamento, usado na geofísica para detectar variações na velocidade com que ondas se agitam na crosta terrestre, a partir de gravações de ruído sísmico.

## 4. Conclusões

No presente trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com base nas metodologias avançadas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) de materiais compósitos, abrangendo as principais características de algumas das técnicas mais utilizadas nos últimos anos.

Os materiais compósitos possibilitam diversas formas de combinações de materiais, e cada

configuração definida viabiliza o uso de uma ou mais técnicas de SHM. Dessa forma, a natureza dos materiais constituintes, que envolve suas propriedades mecânicas, elétricas, ópticas, químicas, magnéticas e acústicas, são determinantes no sucesso do emprego de um determinado método de SHM. Além disso, estudos recentes mostram uma grande tendência de uso de SHM *in-situ* (SHM dentro do próprio material compósito).

Por meio da análise dos trabalhos encontrados na literatura, relacionados à SHM, percebe-se a importância de se considerar o fator custo na adoção de uma determinada técnica de SHM, uma vez que muitas delas são de alto custo de implantação e de manutenção, e podem muitas vezes fornecer informações que não sejam tão relevantes para o objetivo maior da inspeção.

Salienta-se que cada estudo envolve uma série de variáveis particulares, que influenciam desde a técnica adotada para o NDT até na qualidade e na precisão do resultado. A escolha por uma determinada técnica deve estar totalmente alinhada com os recursos e os objetivos do inspeção, a fim de que não haja falhas nas previsões de desempenho do material compósito aplicado.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, pelo suporte e pela estrutura física. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

CRIVELLI, D.; GUAGLIANO, M.; EATON, M. PEARSON, M.; AL-JUMAILI, S.; HOLFORD, K.; PULLIN, R. Localisation and identification of fatigue matrix cracking and delamination in a carbon fibre panel by acoustic emission. **Composites Part B: Engineering**, v. 74, p. 1-12, 2015.

DE MEDEIROS, R.; VANDEPITTE, D.; TITA, V. Structural health monitoring for impact damaged composite: a new methodology based on a combination of techniques. **Structural Health Monitoring**, v. 17, n. 2, p. 185-200, 2018.

DUCHENE, P.; CHAKI, S.; AYADI, A.; KRAWCZAK, P. A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 11, p. 7915-7938, 2018.

GUILD, F.J.; BALHI, N.; VRELLOS, N.; DRINKWATER, B.W.; OGIN, S.L. SMITH, P.A. Intra-laminar cracking in CFRP laminates: observations and modelling. **Journal of Materials Science**, v. 41, p. 6599-6609, 2006.

LI, Y.; LIAO, Y.; SU, Z. Graphene-functionalized polymer composites for self-sensing of ultrasonic waves: An initiative towards "sensor-free" structural health monitoring. **Composites Science and Technology**, v. 168, p. 203-213, 2018.

LI, Z.; HAIGH, A.; SOUTIS, C.; GIBSON, A. Principles and Applications of Microwave Testing for Woven and Non-Woven Carbon Fibre-Reinforced Polymer Composites: a Topical Review. **Applied Composite Materials**, v. 25, p. 965-982, 2018.

LIU, M.; ZENG, Z.; XU, H.; LIAO, Y.; ZHOU, L.; ZHANG, Z.; SU, Z. Applications of a nanocomposite-inspired in-situ broadband ultrasonic sensor to acousto-ultrasonics-based passive and active

structural health monitoring. **Ultrasonics**, v. 78, p. 166-174, 2017.

McCRORY, J.P.; AL-JUMAILI, S.K.; CRIVELLI, D. PEARSON, M. R.; EATON, M.J.; FEATHERSTON, C.A.; GUAGLIANO, M.; HOLFORD, K.M.; PULLIN, R. Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques. **Composites Part B: Engineering**, v. 68, p. 424-430, 2015.

MUC, A.; BARSKI, M.; CHWAL, M.; ROMANOWICZ, P.; STAWIARSKI, A. Fatigue damage growth monitoring for composite structures with holes. **Composite Structures**, v. 189, p. 117-126, 2018.

RÜZEK, R.; LOHONKA, R.; JIRONC, J. Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification. **NDT & E International**, v. 39, p 132-142, 2006.

SELVA, P.; CHERRIER, O.; BUDINGER, V.; LACHAUD, F.; MORLIER, J. Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks. **Engineering structures**, v. 56, p. 794-804, 2013.

SHI, J.-X.; NATSUKI, T.; LEI, X.-W.; NI, Q.-Q. Wave propagation in the filament-wound composite pipes conveying fluid: Theoretical analysis for structural health monitoring applications. **Composites Science and Technology**, v. 98, p. 9-14, 2014.

STAWIARSKI, A. The nondestructive evaluation of the GFRP composite plate with an elliptical hole under fatigue loading conditions. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 112, p. 31-43, 2018.

TALLMAN, T.N.; GUNGOR, S.; WANG, K.W.; BAKIS, C.E. Damage detection and conductivity evolution in carbon nano fiber epoxy via electrical impedance tomography. **Smart Materials and Structures**, v. 23, 2014.

TSOGKA, C.; DASKALAKIS, E.; COMANDUCCI, G; UBERTINI, F. The Stretching Method for Vibration-Based Structural Health Monitoring of Civil Structures. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 32, p. 288-303, 2017.

TULOUP, C.; HARIZI, W.; ABOURA, Z.; MEYER, Y.; KHELIL, K. LACHAT, R. On the use of in-situ piezoelectric sensors for the manufacturing and structural health monitoring of polymer-matrix composites: A literature review. **Composite Structures**, v. 215, p. 127-149, 2019.

VALVONA, F.; TOTI, J.; GATTULLI, V.; POTENZA, F. Effective seismic strengthening and monitoring of a masonry vault by using Glass Fiber Reinforced Cementitious Matrix with embedded Fiber Bragg Grating sensors. **Composites Part B: Engineering**, v. 113, p. 355-370, 2017.

YANG, S.-H.; KIM, K.-B.; OH, H.G.; KANG, J.S. Non-contact detection of impact damage in CFRP composites using millimeter-wave reflection and considering carbon fiber direction. **NDT&E International**, v. 57, p. 45-51, 2013.