

## TTEM 007/15

### ENSAIO DE *SHEAROGRAFIA* APLICADO A MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

### SHEAROGRAPHY TESTING APPLIED TO COMPOSITE MATERIALS USED IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

Signatários:

- Ariel Juan Dias Quinteros <sup>1</sup>
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Giorgio Eugenio Ocare Giacaglia – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP
- Prof. Dr. José Rui de Camargo – Universidade de Taubaté

Finalidade: Apresentar o ensaio de *shearografia* como um método inovador de ensaio não destrutivo (END) aplicado a materiais compósitos utilizados na indústria aeronáutica.

Duração: 3 meses

1 – Aluno do curso de Especialização em Engenharia Aeronáutica da Universidade de Taubaté (UNITAU/SP) – arieljuan2@hotmail.com

Palavras chave: *Shearografia*. Interferometria Óptica. Ensaios Não Destrutivos. Materiais Compósitos.

**Resumo.** O aumento exponencial do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica nos últimos anos leva a busca por novas técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END) que sejam menos invasivas, rápidas e confiáveis. Para tanto, o ensaio de *shearografia* apresenta-se como uma recente técnica óptica de END com resultados eficazes na detecção de danos/defeitos críticos em estruturas aeronáuticas compósitas. Além disso, pode ser feita em campo, com equipamentos portáteis, trazendo maior flexibilidade, desde que sejam seguidas todas as condições básicas do ensaio que permitam a correta detecção de danos/defeitos.

## 1. INTRODUÇÃO

O ensaio de *shearografia* vem sendo considerado como uma nova forma de Ensaio Não Destrutivo (END), tendo diversas vantagens pelo fato de ser uma técnica de inspeção relativamente rápida, confiável e de grande sensibilidade, permitindo a avaliação de pequenas deformações em componentes estruturais. É uma técnica que utiliza luz *laser* para medir, com grande precisão, pequenas deformações ocorridas nas superfícies de peças e componentes decorrentes da aplicação de um determinado carregamento.

Além disso, a *shearografia* pode ser operada fora do ambiente laboratorial e vem sendo aplicada em alguns estágios da produção industrial, especialmente nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. No Brasil, o ensaio já é reconhecido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), através de suas Instruções Suplementares (IS), como um procedimento aceitável de END em produtos aeronáuticos, desde a qualificação de inspetores até a sua execução na manutenção aeronáutica.

Ao ser aplicado em materiais compósitos, especialmente os laminados rígidos e os painéis sanduíche de *honeycomb* (do tipo “colmeia”) utilizados como estruturas aeronáuticas ou aeroespaciais, o ensaio de *shearografia* fornece bons resultados e é uma ferramenta que pode ser utilizada tanto em campo quando na linha de produção, através de equipamentos portáteis ou automatizáveis. Seu uso é mais descomplicado em comparação com outras técnicas, como o ultrassom, e fornece resultados precisos para a detecção de defeitos ou falhas superficiais ou subsuperficiais.

## 2. ENSAIO DE SHEAROGRAFIA

A partir de um dispositivo especial de cisalhamento (*shearing*, em inglês), a *shearografia* realiza a mensuração de gradientes de deslocamento, gerando informações detalhadas sobre a deformação experimentada pelo material sob inspeção quando o mesmo é submetido a uma determinada excitação ou carregamento externo. A técnica de mensuração é realizada por intermédio de uma luz *laser* e é baseada no processamento de dados digitais obtidos a partir de técnicas de deslocamento de fase e de interferometria óptica (MIRANDA, 2011).

A interferometria óptica é uma técnica amplamente reconhecida por sua sensibilidade extremamente elevada para a medição de diversas grandezas físicas. Em particular, quando aplicada à medição de deslocamentos mecânicos, permite a detecção de movimentos micrométricos e manométricos em sólidos (GALETI, 2012).

Segundo Galetti (2012), o princípio da interferometria é medir a variação da radiação proporcionada pela superposição de dois feixes ópticos. Esta radiação possui características que dependem das intensidades, polarizações, frequências e fases dos feixes que geram a interferência. No caso da interferometria de dois feixes, quando um deles é tomado como referência, é possível determinar as características do outro através da análise da intensidade de radiação gerada pela superposição. Na operação com óptica volumétrica, os interferômetros Mach-Zehnder e Michelson são as configurações mais utilizadas.

De acordo com Fraga, Tavares, Martins e Rossi (2009), um sistema de *shearografia* possui a seguinte configuração básica, mostrada na Figura 1:

- Visualização e Aquisição de Imagens: por meio de um cabeçote *shearográfico* composto por uma câmera digital de alta resolução com alguns elementos óticos;
- Iluminação da superfície da estrutura em análise: através de luz *laser*;
- Carregamento ou Excitação da estrutura em análise: térmico, a vácuo, mecânico ou vibracional.
- Processamento de Imagens: através de um microcomputador conectado ao cabeçote *shearográfico*.

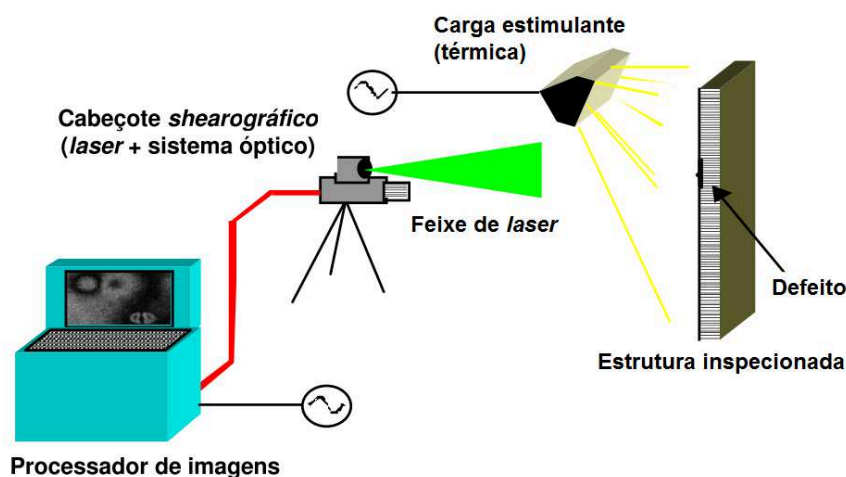


Figura 1 – Configuração básica de um sistema *shearográfico*.  
Fonte: Adaptação de MIRANDA (2011).

O procedimento de inspeção não destrutiva por *shearografia* consiste de quatro passos fundamentais (FRAGA, TAVARES, MARTINS e ROSSI, 2009):

- 1) Aquisição de Imagem de Referência da superfície da estrutura em análise;
- 2) Aplicação do carregamento ou excitação à estrutura em análise;
- 3) Aquisição da imagem da superfície da estrutura em análise no estado deformado;
- 4) Processamento das imagens e obtenção do resultado por meio de *software* específico instalado no microcomputador.

O objeto ou estrutura sob inspeção neste tipo de técnica não destrutiva é iluminado com luz *laser* irradiada a partir de uma fonte pontual, sendo simultaneamente filmado por uma câmera digital de alta resolução, que possibilita a captura e a imediata comparação de imagens subsequentes apresentando pequenas diferenças de deslocamentos. Estes deslocamentos representam as deformações cisalhantes causadas pela ação de um modo de excitação externa (MIRANDA, 2011).

A Figura 2 mostra o posicionamento da fonte de luz *laser* e da câmera, contida em um cabeçote *shearográfico*.

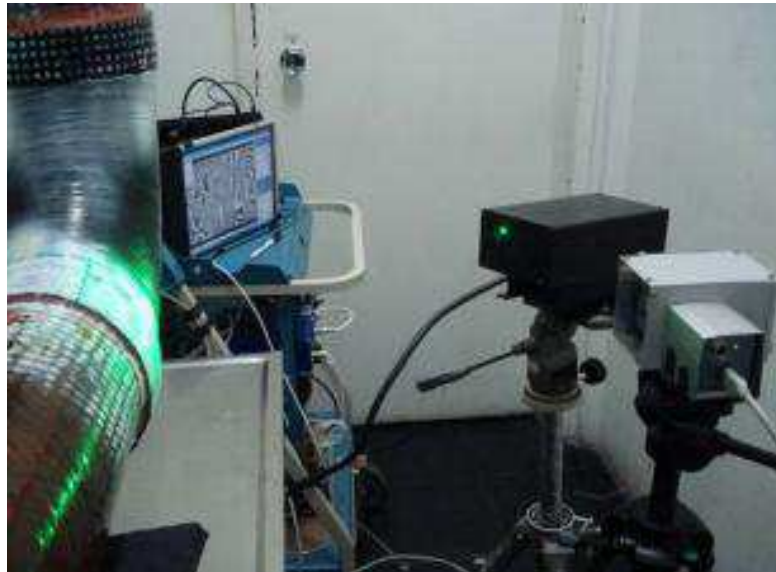


Figura 2 – Ensaio de *shearografia* sendo aplicado em uma peça curvada.  
Fonte: FRAGA, TAVARES, MARTINS e ROSSI (2009).

Segundo Miranda (2011), a câmera digital do cabeçote *shearográfico* é conectada a um microcomputador para a gravação e posterior processamento das imagens obtidas, sendo composta por um sensor de imagens CCD, uma lente e um dispositivo de cisalhamento da imagem. Este último dispositivo é constituído por um prisma duplamente refrativo e por um polarizador, e a sua função é a de produzir um par de imagens lateralmente deslocadas (ou seja, cisalhadas) da estrutura inspecionada, derivando daí o nome da técnica em questão. A Figura 3 mostra o esquema básico do cabeçote *shearográfico*.

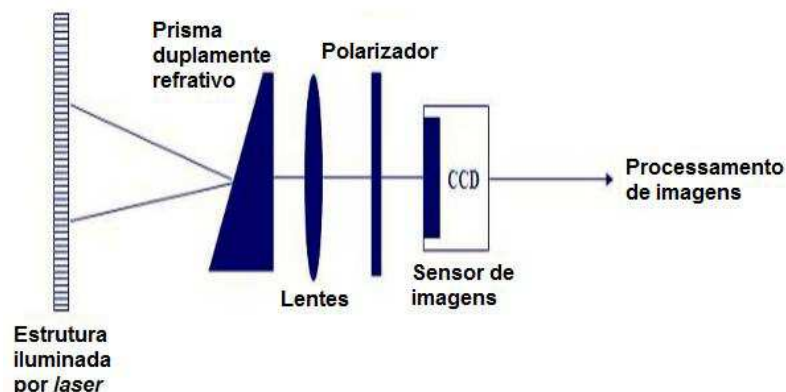


Figura 3 – Configuração interna de um cabeçote *shearográfico*,  
Fonte: Adaptação de MIRANDA (2011).

De acordo com Hung (1999), o princípio de deslocamento ou cisalhamento da imagem usando um prisma duplamente refrativo é ilustrado na Figura 4. É através deste prisma que dois feixes de luz não paralelos dispersos de dois pontos diferentes do objeto se tornam praticamente colineares. Com isso, estes feixes de luz produzem uma frequência de interferência padrão muito baixa que é facilmente adquirida pelo sensor de imagem do tipo CCD.

As duas frentes de onda cisalhadas, transmitidas pelos dois eixos do dispositivo de cisalhamento da imagem, entretanto, são polarizadas ortogonalmente, logo elas não irão se interferir entre si. Para permitir a interferência, um polarizador com seu eixo de polarização orientado a  $45^\circ$  é requerido. Como uma superfície de um objeto é geralmente opticamente rugosa (apresenta um micro relevo onde a altura dos picos individuais é comparável ou maior do que o comprimento de onda da luz usada para iluminação da superfície), a interferência das duas frentes de onda cisalhadas irá resultar em um padrão de *speckle* que será incorporado na imagem *shearográfica* (HUNG, 1999).

Segundo Pires, Tagiaferri e Thaumaturgo (2000), o efeito *speckle* é um dos principais fenômenos resultantes da interação de uma iluminação coerente com uma superfície opticamente rugosa. Por efeito *speckle* quer dizer o fenômeno de interferência de ondas mutuamente coerentes com uma variação ao acaso de fase. O resultado deste tipo de interferência é uma distribuição de máximos e mínimos na intensidade da luz que é estacionária no tempo, mas aleatória no espaço. Os picos individuais de intensidade representando pequenas manchas claras ou escuras são chamados de *speckle*. O agrupamento destes *speckles* é usualmente chamado de padrão de *speckle* (Figura 4).

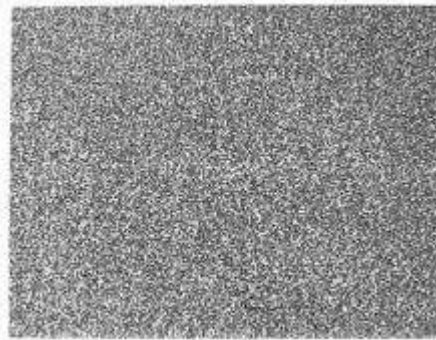


Figura 4 – Padrão de *speckle* característico.  
Fonte: PIRES, TAGIAFERRI e THAUMATURGO (2000).

Este padrão de *speckle* é ligeiramente alterado quando o objeto é deformado. Dois padrões de *speckle* da superfície em teste, um antes do carregamento e outro depois - que é ligeiramente deformado - são capturados pela câmera e digitalizados para um microcomputador. A superposição entre os dois padrões de *speckle* irá formar de um padrão de franjas visível na imagem, que descrevem as derivações de deslocamento com relação à direção de cisalhamento da imagem.

As imagens obtidas durante o ensaio são compostas basicamente por franjas não-homogêneas de interferência, como as da Figura 5, as quais apresentam características típicas, tais como densidade e disposição espacial, que podem revelar, direta ou indiretamente, a presença de algum dano ou defeito superficial ou subsuperficial no componente avaliado.



Figura 5 – Exemplo de imagem obtida em um ensaio de *shearografia*, com as franjas de interferência em destaque.

Fonte: FRAGA, TAVARES, MARTINS e ROSSI (2009).

Diversos tipos de carregamento podem ser aplicados à estrutura inspecionada de modo a causar, na superfície da mesma, os efeitos passíveis de serem mensurados e transformados em imagens (MIRANDA, 2011).

A Figura 6 mostra quatro diferentes tipos de carregamento: vibracional (a) – aplicado por meio de um alto-falante, a vácuo (b) – utilizando-se uma bomba de vácuo, mecânico (c) – aplicado por meio de carregamentos na base que sustenta a estrutura em investigação e térmico (d) – por meio de uma lâmpada.

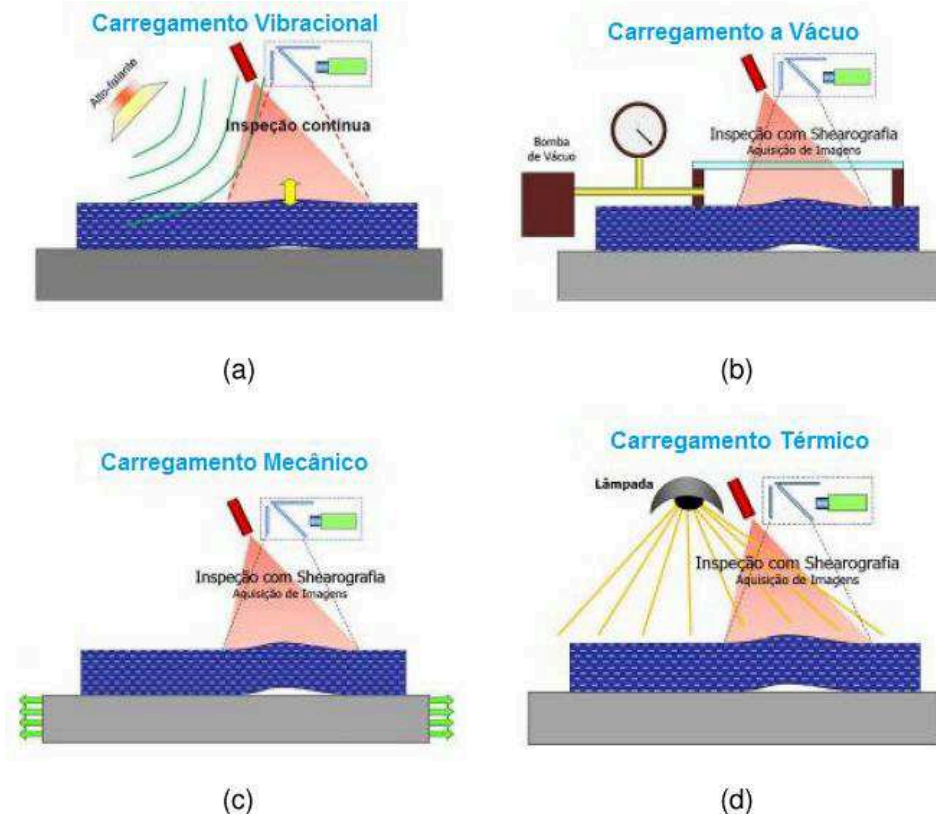


Figura 6 – Tipos de carregamento que podem ser aplicados no ensaio *shearográfico*.  
Fonte: Adaptação de MIRANDA (2011).

Quando um objeto contendo um defeito ou um dano é submetido a um carregamento, as concentrações de tensão nos cantos vivos ou nas proximidades do defeito são induzidas. Se a falha não for muito distante da superfície do objeto, esta concentração de tensão induzida irá causar anormalidades na distribuição de tensões na superfície. Consequentemente, estas anormalidades serão traduzidas em franjas de interferência anômalas. Assim, a *shearografia* revela falhas tanto superficiais quanto subsuperficiais através da identificação de anomalias no padrão de franjas (HUNG, 1999).

## 2.1 Equipamentos *shearográficos*

De acordo com Miranda (2011), a *shearografia* é uma técnica de inspeção que também pode ser aplicada em campo, porém com algumas adaptações em relação ao uso laboratorial, dada a grande sensibilidade do equipamento a vibrações mecânicas e variações térmicas inesperadas. Caso estes efeitos possam ser controlados ou evitados, a *shearografia* tem grande potencial para realizar a rápida detecção de danos ou defeitos, permitindo a confecção imediata de laudos técnicos após a finalização dos ensaios.

Em várias ocasiões, a inspeção não destrutiva deve necessariamente ser realizada em campo, como, por exemplo, na manutenção, no reparo e na montagem de aeronaves e suas partes. Por isso, um equipamento ou um sistema portátil de END é fundamental. Sistemas *shearográficos* portáteis já estão em franco desenvolvimento e são aplicados especialmente nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, conforme mostra a Figura 7 o equipamento portátil Q-810 da Dantec Dynamics. Este equipamento é constituído por uma pequena câmara de vácuo que suga diretamente a área da superfície a ser inspecionada.

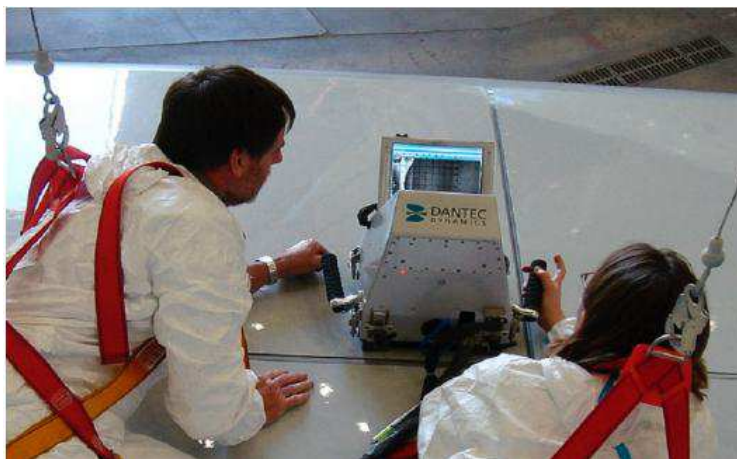


Figura 7 – Equipamento portátil Q-810 da Dantec Dynamics sendo aplicado em uma estrutura compósita aeronáutica. Fonte: Dantec Dynamics.

Uma vez que esta área é excitada mecanicamente pelo vácuo aplicado, uma câmera digital CCD interna, acompanhada de todo o sistema óptico de lentes, polarizador e iluminação a *laser* grava todos os deslocamentos (os quais são posteriormente convertidos em deformação) que ocorrem na superfície da peça. As imagens são capturadas na forma de franjas de interferência e permitem, após o seu processamento digital, acusar a presença e a localização de eventuais danos ou defeitos na peça. O operador pode visualizar o resultado da inspeção na tela do equipamento, tornando o sistema bastante flexível para ser operado em andaimes, por exemplo, onde a mobilidade é bastante reduzida e o tempo disponível para inspeção é relativamente escasso (MIRANDA, 2011).

Segundo a Dantec Dynamics, o tempo total da inspeção, por imagem coletada, é de até quinze (15) segundos, e a área amostrada por imagem é de aproximadamente 230 mm x 180 mm.

## 2.2 Vantagens e desvantagens da *Shearografia*

De acordo com Miranda (2011), as principais vantagens do ensaio de *shearografia* são:

- Inspeção global (não pontual);
- Ausência de contato do equipamento com a superfície a avaliar;
- Grande sensibilidade (da ordem de 10 nm);
- Rapidez (poucos segundos para o processamento de uma imagem);
- Capacidade de operação fora do ambiente laboratorial;
- Acesso a apenas um lado da peça;
- Insensível à geometria da peça;
- Elevado grau de automação;
- Acompanhamento da evolução por registro digital e comparação ao longo do tempo;
- Possibilidade de avaliação da extensão e severidade de danos/defeitos;
- Customização do sistema de acordo com a necessidade.

Já a principal desvantagem da *shearografia* é que, assim como a termografia infravermelha, não é uma metodologia de volume (como a são a ultrassonografia e a radiografia), mas sim capaz de detectar apenas defeitos superficiais e subsuperficiais. Além disso, a aplicação de um carregamento externo é necessária para que sejam detectados os possíveis danos/defeitos na superfície do material sob inspeção.

## 3. MATERIAIS COMPÓSITOS DE USO AERONÁUTICO

Materiais compostos ou compósitos são produtos fabricados através da combinação física, racional e volumétrica, de dois ou mais materiais, orgânicos ou inorgânicos, diferindo entre si na forma, composição química e arranjo estrutural. Possuem interfaces bem definidas e são insolúveis entre si. Os componentes se interagem para que um deles seja a matriz, que funciona como a estrutura ou aglutinador do material, e o outro seja o reforço, em forma de fibras entrelaçadas na matriz (MIRANDA, 2011).

Atualmente, as matrizes mais utilizadas são as resinas chamadas de termofixas ou termorrígidas, tais como epóxi, bismaleimida e poliamida. Já os materiais de reforço podem ser fibras de vidro, boro, aramida (*Kevlar*), carbono ou alguma mistura entre estes.

Segundo Rezende e Botelho (2000), o objetivo é criar um produto com propriedades mecânicas e estruturais superiores em relação aos materiais convencionais, com alta razão resistência-peso, maior resistência contra a corrosão e a fadiga, resistência a altas temperaturas, propriedades anti-chama e maior resistência a impactos.

O material compósito se tornou um diferencial competitivo nas indústrias aeronáutica e aeroespacial devido a seu peso reduzido e alto desempenho mecânico, conseqüentemente reduzindo a motorização, o consumo de combustível e as falhas por corrosão e fadiga, além de melhorar parâmetros de desempenho (REZENDE e BOTELHO, 2000).



Conforme Miranda (2011), o uso dos materiais compósitos na indústria da construção aeronáutica comercial tem sido exponencialmente ampliado nos últimos 15 anos. Um bom exemplo é a recente aeronave Boeing 787 Dreamliner (Figura 8), cujo percentual em massa de compósitos poliméricos nas suas estruturas primárias e secundárias alcançou a cifra de 54%.



Figura 8 – Materiais de construção mecânica utilizados na fabricação da aeronave Boeing 787 Dreamliner. Fonte: MIRANDA (2011).

Dois dos materiais compósitos mais utilizados em produtos aeronáuticos são os laminados sólidos ou rígidos e os painéis sanduíche com núcleo de *honeycomb* (em forma de “colmeia”). De acordo com Miranda (2011), os laminados compósitos sólidos (ou rígidos) de matriz polimérica avançada, especialmente aqueles reforçados com fibra de carbono, apresentam ótimas propriedades específicas (elevada razão propriedade / densidade), como:

- Alta resistência mecânica e rigidez;
- Notável desempenho sob fadiga;
- Elevada temperatura máxima de operação sob serviço;
- Boa resistência química a solventes em geral;
- Notáveis estabilidades térmica e dimensional mesmo na presença de umidade.

Tais características garantem o amplo e já tradicional emprego desta classe de materiais na indústria aeronáutica comercial, onde economia de combustível e maximização da carga transportada são requisitos fundamentais do projeto estrutural.

Segundo Almeida (2009), um painel sanduíche é um tipo de material composto construído por uma estrutura de três camadas: dois laminados finos, rígidos e resistentes de material denso, separados por uma camada (núcleo) de um material de baixa densidade e que pode ser muito menos rígido e resistente do que os laminados. As diferentes tipologias e formas estruturais dos painéis sanduíche podem ser obtidas através da combinação de diferentes formas dos materiais de núcleo.

Os núcleos *honeycomb* ou “colmeia”, vide Figura 9, são constituídos por células abertas na direção transversal aos laminados, proporcionando um suporte bidirecional dos mesmos. Suas boas propriedades mecânicas (ex. maior capacidade de compressão e cisalhamento, resistência ao impacto e à fadiga) e sua densidade reduzida conferem a este material de núcleo um bom desempenho por

unidade de peso, fazendo desta a configuração preferencial em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais.

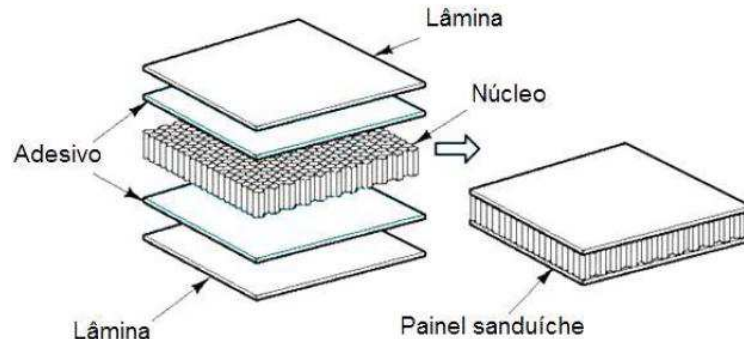


Figura 9 – Constituição de um painel sanduíche com núcleo *honeycomb*.

Fonte: ALMEIDA (2009).

As células do *honeycomb* possuem diversas configurações: hexagonais, triangulares, quadradas, lâminas onduladas, enrugadas, etc. Podem ser construídas com: papel impregnado com resina, fibra de vidro, fibra de carbono, aramida, polipropileno e até alumínio.

### 3.1 Danos e Defeitos em Materiais Compósitos

Para compreender melhor os resultados do ensaio *shearográfico*, é necessária uma diferenciação entre os conceitos de defeito (*defect, flaw*) e dano (*damage*). Conforme Miranda (2011), defeitos são gerados durante os estágios de manufatura e de reparo dos laminados compósitos (inclusive como decorrência de erros no estágio de projeto ou concepção da peça, componente ou estrutura). Já os danos podem ser criados, além das duas etapas acima, durante os estágios de montagem, em situações de voo e durante, principalmente, as etapas de manutenção e inspeção não destrutiva da aeronave. De qualquer maneira, tanto danos quanto defeitos comprometem severamente o desempenho mecânico do componente estrutural em serviço.

Os defeitos mais comuns nos laminados compósitos, de acordo com Miranda (2011), podem ser listados:

- Número, posicionamento e orientação impróprios de fibras fortalecedoras;
- Fibras onduladas;
- Presença de vincos;
- Gradientes indesejáveis de espessura;
- Sequência incorreta de empilhamento das camadas ou lâminas individuais;
- Resina incompatível ao compósito;
- Concentradores indesejáveis de tensão;
- Cura imprópria da resina;
- Áreas ricas em resina (ou carentes de fibras);
- Bolhas, vazios, inclusões (papeis e filmes poliméricos);
- Trincas, fibras rompidas;
- Delaminações;
- Usinagem, lixamento e furação impróprios;

- Contaminação da superfície de linhas de colagem (levando a descolamentos ou falta de adesão);
- Posicionamento incorreto de furos e demais detalhes construtivos.

Enquanto isso, os principais tipos de danos incluem:

- Trincas e delaminações;
- Fibras quebradas;
- Descolamento de fibras da matriz, causadas por cargas dinâmicas (impactos), cíclicas (fadiga), manuseio impróprio (ex. quedas), além de queima por descargas elétricas naturais (raios) ou por incêndio;
- Erosão, degradação da matriz, das fibras e da interface matriz/fibra por exposição a raios ultravioletas, líquidos (combustível, fluido hidráulico, solventes), a ambientes salinos, oxidativos, úmidos (especialmente sob altas temperaturas), bem como por ação de ciclos térmicos e termomecânicos.

#### 4. APLICAÇÃO DA *SHEAROGRAFIA* EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE USO AERONÁUTICO

A *shearografia* já se encontra bem difundida em várias aplicações de END e já conquistou a aceitação industrial como uma ferramenta útil para testes não destrutivos, especialmente em estruturas compósitas utilizadas na indústria aeronáutica, como em painéis sanduíche de *honeycomb* ("colmeia"), além de ser bastante efetivo na revelação de danos ou defeitos em laminados compósitos rígidos (HUNG, 1999).

No Brasil, o ensaio de *shearografia* já é reconhecido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) desde 2009, através de suas Instruções Suplementares (IS), como uma técnica não destrutiva aplicável em produtos aeronáuticos, desde que o procedimento adote normas de padrões internacionais, ou seja, indicado pelo fabricante do produto aeronáutico. A seguir serão apresentados alguns resultados de ensaios *shearográficos* aplicados em materiais compósitos utilizados frequentemente na indústria aeronáutica.

A Figura 10 mostra uma *shearografia* realizada em um painel sanduíche de *honeycomb* (colmeia), com laminados de fibra de carbono, através de um carregamento externo a vácuo. As diversas franjas de interferência, de formato semicircular, denunciam a presença de delaminações nos laminados do painel.

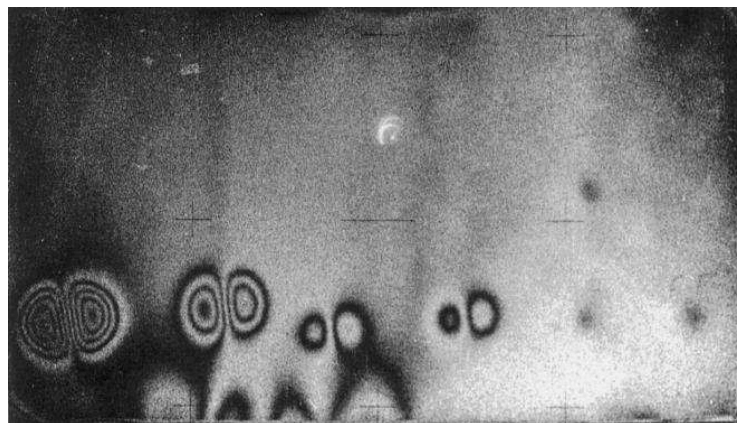


Figura 10 – Diversas delaminações em um painel sanduíche de *honeycomb*. Fonte: HUNG (1999).

Já a Figura 11 destaca a presença de uma delaminação em um tubo de fibra de carbono após o ensaio de *shearografia*, através do padrão de franjas de interferência semicirculares que destoam do restante das franjas, que possuem espessura e densidade muito maiores. O carregamento utilizado no ensaio foi conseguido através de uma pressurização interna.



Figura 11 – Delaminação em um tubo de fibra de carbono. Fonte: HUNG (1999).

Na Figura 12, uma pá (*blade*) de uma turbina aeronáutica, feita de material compósito, foi submetida a uma *shearografia* com um carregamento térmico (através de radiação térmica). O resultado foi uma alternância nítida dentro do padrão de franjas de interferência, que indicou a presença de uma trinca na pá (em destaque na figura).



Figura 12 – Trinca em uma pá de turbina compósita, destacada na elipse em vermelho.  
Fonte: Adaptação de HUNG (1999).

Atualmente existem técnicas *shearográfica* mais avançadas, tanto em laboratório quanto em campo, que exibem as imagens dos resultados em um “mapa de cores”, semelhante a resultados de análises por elementos finitos, mas que ainda contém os mesmos padrões de franjas de interferência para os defeitos/danos. A Figura 13 mostra um exemplo de resultado *shearográfico* apresentado pelos equipamentos da Dantec Dynamics.

O primeiro quadro mostra a peça ainda sem o carregamento e destaca o defeito, localizado no núcleo de um painel sanduíche. No segundo quadro, a peça já está carregada, o que faz surgir uma deformação na superfície do painel. Esta deformação superficial é mostrada no terceiro quadro, cujo resultado é apenas em relação a deformações fora do plano da superfície. No quarto e último quadro, é mostrado o gradiente de deformação após o carregamento do painel, com a deformação superficial em cores mais escuras (ex. azul, roxo) e a deformação subsuperficial, no material de núcleo, em cores mais claras (ex. vermelho, amarelo).

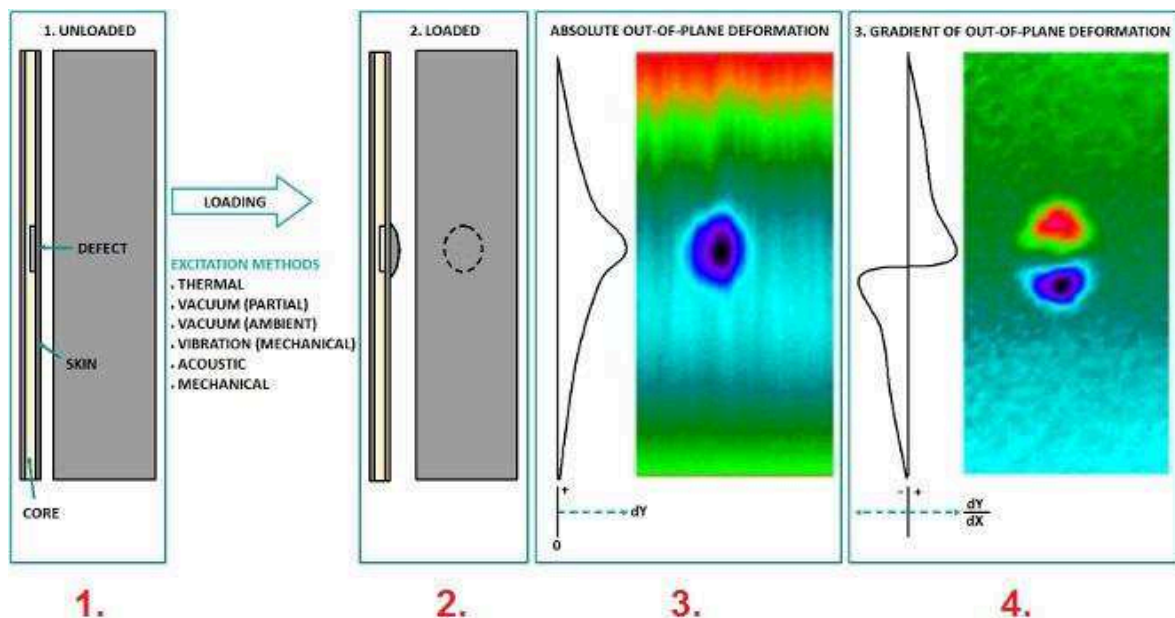


Figura 13 – Exemplo do passo-a-passo do processo de inspeção *shearográfica* em um painel sanduíche com defeito no núcleo.

Fonte: Dantec Dynamics.

#### 4.1 Comparação com o ultrassom C-Scan

A Figura 14 mostra uma comparação entre um resultado obtido em um ensaio de *shearografia* digital (figura acima) e em um ensaio de ultrassom C-Scan (figura abaixo), ambos realizados em uma mesma amostra de um laminado compósito.

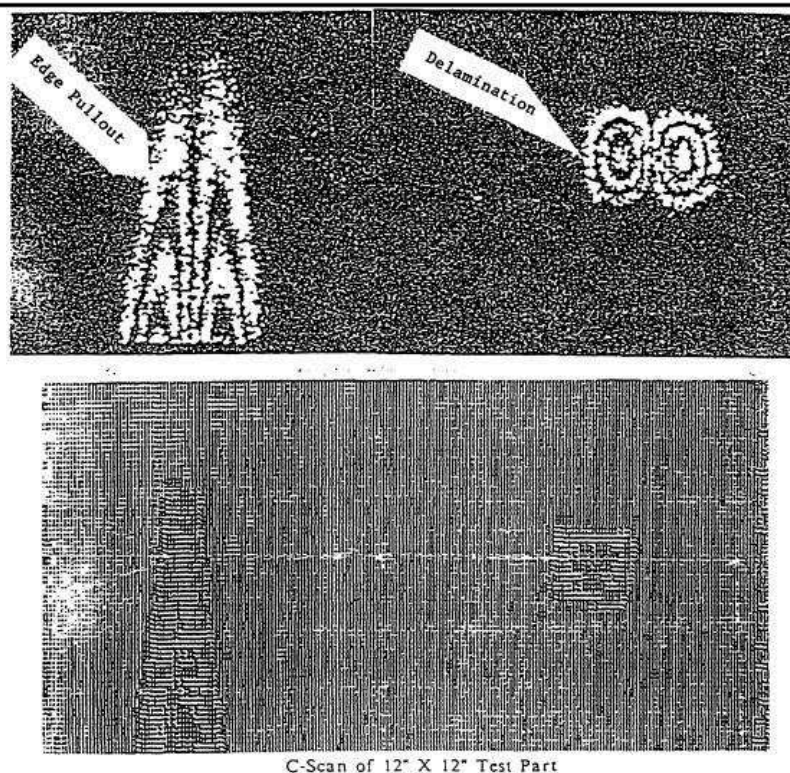


Figura 14 – Comparação entre a *shearografia* e o ultrassom C-Scan, aplicados a uma amostra de um laminado compósito. Fonte: HUNG (1999).

De acordo com Hung (1999), ambas as técnicas revelam um arrancamento na borda do material (*edge pullout*) e uma delaminação (*delamination*). Através da *shearografia*, os defeitos começam a ser revelados em menos de um (1) segundo, enquanto a técnica de ultrassom requer um escaneamento ponto-a-ponto ao longo da superfície da amostra, para garantir que toda a área em teste seja escaneada. Isto requer um tempo de ensaio de aproximadamente dez (10) minutos. Além disso, é necessária a presença de um fluido acoplante entre o transdutor do equipamento ultrassônico e a superfície da amostra, enquanto na *shearografia* não existe contato algum entre o equipamento e o material em inspeção.

Porém, uma limitação da *shearografia* é a necessidade de elementos que garantam a aplicação de um carregamento externo ou excitação (mecânico, térmico, vibracional ou a vácuo) adequada à amostra sob inspeção, já que o princípio fundamental desta técnica é baseado na resposta dos danos/defeitos às tensões causadas pelas excitações ou carregamentos externos. Este carregamento deve ser bem mensurado, de forma que represente as condições que o material sofre durante seu serviço, mas que não cause nenhum dano/defeito adicional ao material sob inspeção.

O desenvolvimento de procedimentos não destrutivos que utilizam a *shearografia* recai sobre meios práticos para desenvolver o carregamento externo necessário para a detecção de danos/defeitos. Idealmente, é desejável que tais carregamentos sejam similares aos encontrados pelo material durante seu uso, de modo que a *shearografia* revele apenas danos/defeitos mais críticos (ex. falhas que criam altas concentrações de tensão e, portanto, comprometem a integridade do componente). Falhas menores, em regiões de baixas concentrações de tensão e que não comprometam a integridade estrutural, podem ser ignoradas e alarmes falsos podem ser evitados (HUNG, 1999).

Neste quesito, a *shearografia* apresenta uma vantagem sobre as técnicas ultrassônicas, já que estas detectam os danos/defeitos através da identificação de heterogeneidades no material e, com isso, não fornecem nenhum tipo de informação com relação à criticidade destes danos/defeitos.

Entretanto, aplicar um carregamento externo para o ensaio *shearográfico*, semelhante ao que o material apresenta durante seu serviço, pode ser muito difícil ou impraticável. Logo, é necessário que todo ensaio de *shearografia* seja bem avaliado para que o carregamento externo mais adequado seja aplicado ao material em teste, de forma que represente o mais próximo possível uma condição de serviço, sem aumentar os danos/defeitos existentes ou criar novos danos/defeitos, e isso se traduza em melhores resultados (HUNG, 1999).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho técnico apresentou o ensaio de *shearografia* como uma técnica de Ensaio Não Destrutivo (END) aplicado a materiais compósitos, que são cada vez mais utilizados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, como os laminados rígidos e os painéis sanduíche de *honeycomb*.

Trata-se de uma inspeção óptica, não invasiva, rápida, confiável e com grande sensibilidade, sendo capaz de detectar danos/defeitos da ordem de centenas de micrômetros. Em um ambiente de fabricação, manutenção ou reparo de aeronaves, podem ser utilizados equipamentos portáteis que flexibilizam a inspeção não destrutiva, utilizáveis em qualquer ponto do componente, peça ou estrutura e que fornecem resultados praticamente instantâneos, facilitando a confecção de laudos técnicos logo após a finalização do ensaio.

Algumas de suas desvantagens são as necessidades da aplicação de um carregamento externo para a aquisição de danos/defeitos nas imagens e o fato de não ser uma metodologia de volume (tal como a ultrassonografia e a radiografia) e sim de superfície, que é capaz de detectar apenas danos/defeitos superficiais ou subsuperficiais.

Por fim, para garantir que o ensaio seja bem sucedido, é fundamental que o carregamento ou excitação externa aplicada ao material sob inspeção seja devidamente mensurado, de maneira que seja o mais fiel possível aos carregamentos que o material normalmente experimente em serviço, mas que não leve a danos/defeitos novos ou maiores do que os já existentes.

## 6. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Aviação Civil. **Instrução Suplementar (IS) nº 43.13-003**. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/certificacao/CI/Textos/IS-43.13-003C-P.pdf>>. Acesso em: 19 de nov. 2015.

ALMEIDA, Maria Inês Avó de. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**. 2009. 161 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2009.

Dantec Dynamics. **Q-810 Vacuum Hood Shearography System**. 2015. Disponível em: <<http://www.dantecdynamics.com/q-810-vacuum-hood-shearography-system>>. Acesso em: 19 de nov. 2015.

FRAGA, Anderson S.; TAVARES, Marcos R.; MARTINS, Kleber; ROSSI, Felipe. **Ensaaios Não Destrutíveis - Termografia**. FISP, Ensaaios Mecânicos, 2009. 49 p.

GALETI, José Henrique. **Medição Interferométrica de Fase Óptica através do Método de Segmentação do Sinal Amostrado**. 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2012.

HUNG, M. Y. Y. **Applications of digital shearography for testing of composite structures**. Department of Mechanical Engineering, Oakland University. In: Composites: Part B 30. 1999. p. 765-773.

MIRANDA, Marcos. **Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas**. 2011. 159 f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.

PIRES, G. P.; TAGIAFERRI, A. A.; THAUMATURGO, C. **Interferometria Óptica Para Ensaaios Não Destrutivos**. Disponível em: < <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10069/>>. Acesso em: 19 de nov. 2015.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. **O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial**. Centro Técnico Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2000.

## 7. Comunicado de responsabilidade

O autor é o único responsável pelo material pesquisado.

**Abstract.** The exponential increase in the use of composite materials in the aircraft industry over the past few years rises the search for new techniques of Non-Destructive Tests (NDT) that are less invasive, faster and more reliable. For that, the shearography presents itself as a recent optical NDT technique that shows efficient results detecting critical flaws/defects on largely used aircraft composite structures. Moreover, it can be performed in field, with portable equipment, bringing more flexibility, provided that all the basic conditions of the test are followed to ensure the accurate detection of flaws/defects.