UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

MARCOS MIRANDA

**Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a
Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas**

São Carlos

2011

MARCOS MIRANDA

**Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a
Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação Interunidades em Ciência e
Engenharia de Materiais da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais

Área de Concentração: Desenvolvimento,
Caracterização e Aplicação de Materiais

Orientador: Prof. Assoc. José Ricardo Tarpani

São Carlos

2011

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

: JW UWUJc[fzZVWYUWcfUXUdYUGY, ~c`XY`HfUHLa Ybhc

XU-bZfa U, ~c`Xc`GYfj], c`XY`6 JV]cHWW!`99 G7 # GD

Marcos Miranda

Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas / Marcos Miranda; orientador José Ricardo Tarpani.--São Carlos, 2011 159p.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Danos e Defeitos de Manufatura. 2. Ensaio Não-Destrutivo. 3. Laminados Sólidos Carbono-Epóxi. I. Título.

Dedicatória

À minha família, e, em especial, à minha noiva, que em todos os momentos me apoiaram no meu empenho e dedicação para a confecção deste trabalho.

Ao apoio na parte técnica que me foi fornecido pela empresa onde trabalho, Embraer Defesa e Segurança, bem como aos meus supervisores e gerentes e, especialmente, à equipe do Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos de São José dos Campos diretamente vinculada ao apoio e à aplicação dos ensaios realizados.

E, por último, mas tão especialmente quanto, gostaria de dedicar esta dissertação ao meu orientador J.R. Tarpani e à instituição USP - São Carlos pelo suporte incondicional por eles proporcionado para a concretização deste trabalho de pesquisa.

Agradecimentos

A Deus.

Ao Professor Associado José Ricardo Tarpani, meu Orientador, pela paciência, dedicação, e valiosos conhecimentos transmitidos e compartilhados.

Ao Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo e, em especial, ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos por proporcionarem todas as condições e facilidades para a condução de meu trabalho de Pós-Graduação.

Aos meus colegas de trabalho Wander, Mario Bueno, Ronaldo, Wilmar, Wladimir, e de pesquisa Alexandre que me auxiliaram nos procedimentos experimentais conduzidos na Embraer em São José dos Campos e na Universidade de São Paulo em São Carlos.

Às empresas Thermal Wave Imaging[®] Inc., Dantec Dynamics[®] GmbH, Photonita[®] Metrologia Óptica, e General Electric[®] pelas inspeções não-destrutivas gratuitas e gentilmente realizadas para os interessados.

Aos técnicos de laboratórios, às secretárias, aos colegas pós-graduandos e aos demais professores do PPG-Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da USP em São Carlos.

Resumo

MIRANDA M. **Comparação entre Métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas** (2011) São Carlos-SP. 159p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

Diversos métodos de ensaios não-destrutivos (Ultrassom, Radiografia, Termografia e *Shearografia*) foram empregados na inspeção de peças laminadas estruturais compósitas sólidas de matriz polimérica manufaturadas pela indústria aeronáutica. Concluiu-se que Ultrassom pulso-eco convencional de contato foi a técnica mais abrangente na indicação de descontinuidades (danos/defeitos de manufatura) considerando-se peças planas e curvas, não obstante tenha falhado na detecção de trincas longas e bem definidas localizada na alma de componentes co-curados. Radiografia convencional por filmes exibiu um potencial interessante como método alternativo, ou complementar ao de Ultrassom. Termografia infravermelha foi a técnica mais veloz na indicação de descontinuidades, sendo uma valiosa alternativa para um mapeamento rápido em inspeções preliminares seguidas pela aplicação de técnicas complementares. *Shearografia* realizada com equipamento da empresa Photonita detectou inclusões em peça plana compósita, porém a interpretação dos resultados obtidos em geometrias mais complexas se mostrou duvidosa. O uso de equipamento *shearográfico* da empresa Dantec indicou posições em regiões curvas que podem estar associadas à presença de defeitos/danos locais, porém uma confirmação cabal desta relação não foi efetivada. Evidências visuais da profusa presença de danos/defeitos de manufatura, além da existência de detalhes construtivos nas peças compósitas mais complexas, sugerem que estas descontinuidades podem ter sensibilizado, em maior ou menor extensão, os equipamentos END, juntamente com a eventual presença de delaminações/falhas de adesão nas respectivas peças avaliadas.

Palavras-chave: Danos e defeitos de manufatura; Inspeção não-destrutiva; Laminados compósitos poliméricos.

Abstract

MIRANDA M. **Comparing Nondestructive Inspection Methods Applied to Aeronautical Grade Solid Structural Composite Laminated Parts** (2011)
São Carlos-SP. 159p. Master Dissertation - Engineering School of São Carlos,
University of São Paulo, Brazil.

Several nondestructive methods (Ultrasonics, Radiography, Thermography and Shearography) were employed for inspection of structural polymer matrix composite laminated parts manufactured by aircraft industry. It has been concluded that conventional pulse-echo contact Ultrasonics was the most comprehensive technique to indicate discontinuities (manufacture damages/defects) in flat and curved parts, although it has failed to detect long and well-defined cracks in co-cured components. Conventional film radiography exhibited good potential as alternative or complementary method to Ultrasonics. Infrared thermography was the fastest technique to indicate discontinuities, so that it is a valuable option for rapid mapping in preliminary inspection followed by the application of complementary techniques. Shearography by means of Photonita equipment detected inclusions in flat panels, but the interpretation of results from pieces with more complex geometries was dubious. A shearographic of the Dantec device indicated positions in curved regions which might possibly be associated to the presence of damages/defects, however this relationship could not be definitively established. Visual evidences of the profuse existence of manufacture damages/defects, besides constructive details in more complex composite parts, suggest that these discontinuities might have affected to some extent the NDT equipments, along with the eventual presence of delaminations/lack of adhesion on the respective evaluated parts.

Keywords: Manufacturing damages and defects; Nondestructive inspection; Polymer composite laminates.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Classificação dos materiais compósitos artificiais (Adaptado da Ref.1)...	28
Figura 2.1	Evolução do emprego estrutural (% em massa) dos materiais compósitos na indústria de construção aeronáutica civil, para aeronaves de médio e grande portes (Adaptado da Ref.4).....	30
Figura 1.2	Utilização externa de materiais de construção na aeronave Boeing Dreamliner 787 (Adaptado da Ref.5).....	31
Figura 2.3	Estruturas básicas das moléculas reagentes e do produto final epóxi DGEBA ^[8]	33
Figura 2.4	Tecidos na forma de trama simples de fibras sintéticas: (a) Carbono; (b) Vidro; (c) Aramida; (d) Fibras sintéticas comparadas a um fio de cabelo. Observe o palito de fósforo empregado como referência nas três primeiras fotos acima (Adaptado da Ref.11).....	36
Figura 2.5	(a) Vista superior da trama de um tecido bidirecional 0/90 de fibras contínuas de vidro; (b) Vista em corte da seção transversal (Adaptado de Ref.1).....	37
Figura 2.6	Esquemático da arquitetura básica de camadas individuais de uma laminado fibroso cuja seqüência de empilhamento das lâminas individuais, na forma de fitas unidirecionais, é [(0/90),(+45/-45) ₂ ,(0/90)] (Adaptado da Ref.12).....	38
Figura 2.7	Esquemático de fitas pré-impregnadas (pré-pregs) com fibras de reforço espessas (100 µm de diâmetro) (a), e finas (7-25 µm) (b) (Adaptado das Refs.13,14).....	39
Figura 2.8	Laminação de um compósito de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas empregando-se a técnica de bolsa de vácuo (Adaptado das Refs.13 e 14).....	40
Figura 2.9	Esquematização de uma autoclave empregada na manufatura de peças compósitas laminadas e embaladas em bolsa de vácuo (Adaptado das Refs.13 e 14).....	42

Figura 2.10	Ciclo de cura estabelecido em termos de vácuo (V), temperatura (T) e pressão (P), o qual é tipicamente aplicado em produção de peças compósitas de elevada responsabilidade e em grande escala empregando-se bolsa de vácuo simultaneamente à autoclave (Adaptado das Refs. 13 e 14).....	42
Figura 2.11	Modelo simplificado da injeção de ondas acústicas (som) em um meio sólido e sua propagação longitudinal por vibração dos elementos que compõem o reticulado cristalino formado, no caso, por átomos (Adaptado da Ref.1).....	47
Figura 2.12	Princípio da ultrasonografia pulso-eco: círculos tracejados indicam o defeito presente na peça, e a seta verde aponta o pico de reflexão (eco) da onda ultrasônica gerado pela sua interação como o defeito (Adaptado da Ref.22).....	48
Figura 2.13	Ecos devidos à presença de várias delaminações em sequência ao longo da espessura de um laminado compósito (setas azuis) (Adaptado da Ref.22).....	49
Figura 2.14	Princípio da ultrasonografia por transmissão, ou por transparência. Observa-se a maior perda de energia (vide setas respectivamente nas cores amarela e verde) por reflexão do feixe ultrasônico durante a sua interação com o defeito (no interior dos círculos tracejados nas cores amarela e verde, respectivamente), quando se confronta o caso (c,d) ao caso (a,b) (Adaptado da Ref.22).....	50
Figura 2.15	(a) Componentes individuais de um transdutor ultrasônico; (b) Diversos tipos de transdutores, dispositivos e aparatos empregados em ensaios ultrasonográficos (Adaptado da Ref.26).....	51
Figura 2.16	(a) Princípio do funcionamento de um <i>squirter</i> por transmissão, ou transparência, empregando colunas d'água que atuam como agentes acoplantes para, respectivamente: (b) Transdutores emissor (E) e receptor (R) de ondas acústicas ultrasônicas. Foto gentilmente cedida pela Embraer S.A.....	53
Figura 2.17	Comparação entre as várias técnicas de varredura ultrasônica: (a) Delaminação (dano ou defeito interno exibindo geometria quase-planar) presente em uma placa laminada compósita; (b) Varredura-Tipo A da descontinuidade (inspeção pontual realizada na superfície da placa	

laminada, numa posição localizada sobre o dano/defeito interno); (c) Varredura-Tipo B da descontinuidade (inspeção conduzida na superfície da placa laminada, utilizando-se movimento linear do transdutor em regiões situadas sobre o dano/defeito); (d) Varredura-Tipo C da descontinuidade (inspeção executada na superfície da placa laminada, com movimentos não-lineares do transdutor em áreas localizadas sobre o dano/defeito) (Adaptado da Ref.22).....	56
Figura 2.18 (a-c) Varreduras-Tipo C obtidas pela inspeção planar sobre três delaminações criadas por impacto com uma esfera de aço de 12,5 mm de diâmetro (respectivamente 20, 10 e 5 Joules) em um laminado compósito sólido, em três posições distintas (ou seja, três tempos de deslocamento de onda, <i>time-of-flight</i>) ao longo da espessura do componente (imageamento tomográfico). Imagens gentilmente cedidas pela Prof ^a . Maria Odila Hilário Cioffi da FEG-Unesp, Guaratingueta-SP...	57
Figura 2.19 (a) Esquemático do efeito de ampla varredura obtido com o sistema <i>phased-array</i> ultrassônico, que permite uma inspeção mais rápida e efetiva da peça em busca de danos e defeitos com uma mínima movimentação e/ou inclinação do transdutor/receptor (Adaptado da Ref.28).....	59
Figura 2.20 (a) Esquematização do potencial de varredura proporcionado pela existência dos 128 elementos transdutores (cristais) no processo <i>phased-array</i> em que conjuntos de 8, 16, 32 ou 64 elementos operam simultaneamente de modo complementar, proporcionando um amplo e rápido alcance do feixe ultrassônico a qualquer ponto da peça inspecionada; (b) Comparação entre as trajetórias de varredura empregando-se, respectivamente, um transdutor pulso-eco de um sistema convencional ultrassônico (acima) com um único elemento e um sistema <i>phased-array</i> de múltiplos elementos em um único transdutor (abaixo). (Adaptado da Ref.28).....	59
Figura 2.21 Comprimentos de onda e correspondentes energias do espectro de radiações eletromagnéticas (Adaptado da Ref.29).....	61
Figura 2.22 Tubo de raios x ilustrando o processo de geração da radiação-x ionizante (Adaptado da Ref.1).....	62
Figura 2.23 Esquematização da inspeção radiográfica por filmes (radiografia convencional ou analógica) (Adaptado da Ref.1).....	64

Figura 2.24	Tubo de raios-X ilustrando o processo de geração da radiação ionizante (Adaptado da Ref.1).....	67
Figura 2.25	Equipamentos de radiografia por raios-X da Embraer S.A.: (a) Fonte; (b) Console de controle; (c) Sistema em operação. Fotos gentilmente cedidas pela Embraer S.A.....	70
Figura 2.26	Procedimentos e equipamentos envolvidos no processo de revelação de chapas radiográficas e análise dos resultados por inspetor qualificado e credenciado (Adaptado da Ref.32).....	71
Figura 2.27	Roteiro cronológico do processo radiográfico tradicional empregando-se raios-X como elemento de caracterização dos materiais (Adaptado da Ref.32).....	72
Figura 2.28	Espectro de radiação eletromagnética, em que se destacam as faixas correspondentes à luz visível (elipse azul) e ao infravermelho (elipse vermelha) (Adaptado da Ref.37).....	73
Figura 2.29	Balanco de energia em um meio sólido semitransparente irradiado em uma de suas faces (Adaptado da Ref.37).....	73
Figura 2.30	Espectro de radiação de um corpo negro (Adaptado da Ref.38).....	75
Figura 2.31	Alguns modos de aquecimento em inspeção termográfica ativa (Adaptado Ref.47).....	78
Figura 2.32	Termografia infravermelha na forma ativa em modos de inspeção por Reflexão e Transmissão, respectivamente (Adaptado da Ref.37).....	78
Figura 2.33	(a) Termografia infravermelha em modo de Reflexão; (b) Curvas temperatura x tempo na superfície inspecionada para o material íntegro e contendo uma descontinuidade geométrica, respectivamente (Adaptado da Ref.48).....	79
Figura 2.34	(a) Sistema completo TIV e operador; (b) Inspeção de um componente estrutural híbrido metal/compósito aeronáutico revelando-se a presença de uma grande delaminação na sua interface (Adaptado da Ref.53).....	81
Figura 2.35	Esquemático operacional básico da <i>shearografia</i> digital (Adaptado da Ref.59).....	84

Figura 2.36	Sistema completo de <i>shearografia</i> digital (Adaptado das Refs.59,61).....	85
Figura 2.37	Diferentes modos de excitação externa em <i>shearografia</i> : (a) Vibracional (inclui ultrassom); (b) Pressão (positiva ou negativa); (c) Mecânica; e (d) Térmica (Adaptado Ref.59).....	85
Figura 2.38	Imagens <i>shearográficas</i> mostrando franjas não-homogêneas de interferência, com densidade e disposição espacial bem estabelecidas, as quais denunciam a existência de concentração de deformações no interior ou na superfície das peças, e que podem estar associadas à presença local de defeitos/danos. Imagens gentilmente cedidas pela Photonita Metrologia Óptica®	86
Figura 2.39	Exemplos de equipamentos portáteis de <i>shearografia</i> que podem ser aplicados em campo (Adaptado da Ref.63).....	87
Figura 2.40	(a) Sistema com câmera flexível utilizado no ensaio de <i>shearografia</i> a vácuo para peças complexas; (b) Ensaio <i>shearográfico</i> à vácuo de painéis estruturais aeronáuticos; (c) Ensaio <i>shearográfico</i> à vácuo de rotores compósitos de helicópteros. campo (Adaptado da Ref.63).....	88
Figura 3.1	Microestrutura da seção longitudinal de um laminado termorrígido C-EPX com distribuição quase-isotrópica de fibras no plano. A direção da espessura do laminado corresponde à altura da página. (Adaptado da Ref.64).....	92
Figura 3.2	Placa de laminado termorrígido C-EPX com arranjo [(0/90),(+45/-45) ₂ , (0/90)] ₆ ensaiada em flexão sob três pontos. Sua microestrutura foi mostrada na Fig. 3.1. (Adaptado da Ref.64).....	93
Figura 3.3	Três (03) peças laminadas compósitas principais submetidas à todas as inspeções não-destrutivas avaliadas nesta Dissertação de Mestrado.....	94
Figura 3.4	Placa-plana compósita laminada (peça 1) em que as setas vermelhas apontam regiões em que foram criadas propositalmente falhas de adesão entre as camadas vizinhas adjacentes do laminado, em diferentes profundidades ao longo de sua espessura de aproximadamente 1,0 mm, tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.....	95
Figura 3.5	Perfil-U laminado compósito (peça 2) em que as linhas amarelas	

	correspondem a curvaturas em que é grande o potencial para o desenvolvimento de defeitos de manufatura, separação entre lâminas, tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.....	96
Figura 3.6	Bordo de ataque I laminado compósito (peça 3) em que as setas magenta e as linhas amarelas indicam regiões de grande potencial para o desenvolvimento de defeitos de manufatura, do tipo separação entre lâminas (delaminação), tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.....	97
Figura 3.7	Parte de tanque de combustível laminado compósito (peça 4) em que a linha amarela e a seta magenta indicam regiões de grande potencial para o desenvolvimento de defeitos de manufatura, tipo vazios alinhados, tal como claramente determinados por US pulso-eco pela Embraer e claramente visíveis a olho nu durante observação da seção transversal: (a) Visão de topo; (b) Seção transversal.....	99
Figura 3.8	Três peças laminadas compósitas, em que as linhas amarelas correspondem a regiões de grande potencial de desenvolvimento de defeitos de manufatura, tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.....	100
Figura 4.1	Procedimento de calibração do equipamento ultrasônico pulso/eco Panametrics Epoch XT [®] , quando a espessura da Placa-Plana (1) é indicada digitalmente na tela.....	104
Figura 4.2	(a) Visão global do equipamento ultrasônico Panametrics Epoch XT [®] operando em modo pulso-eco; (b) Posicionamento do transdutor para realizar a inspeção do Perfil-U (2); (c) Na Placa-Plana (1), com auxílio de glicerina como agente acoplante para garantir o contato pleno do transdutor mono-cristal com a superfície da peça inspecionada.....	104
Figura 4.3	Posicionamentos para calibração (a), e inspeção (b) da peça Placa-Plana (setas vermelhas) no sistema US <i>Squitter</i> da Embraer S.A. As áreas de interesse nas figuras são indicadas pelos círculos tracejados em azul.....	106
Figura 4.4	(a) Equipamento empregado; (b) Um mesmo transdutor de 32 cristais utilizado no ensaio US <i>Phased-Array</i> mostrado em duas vistas distintas.	108
Figura 4.5	Equipamento de raios-X convencionais (por filmes) empregado neste estudo.....	110

Figura 4.6	Equipamento de radiografia digital e tomografia computadorizada cujo uso foi gentilmente permitido pela General Electric® alemã para a realização de alguns ensaios prospectivos.....	112
Figura 4.7	(a) Equipamento completo de termografia pulsada fabricado pela Empresa Americana Thermal Wave Imaging Inc.®, a qual realizou algumas inspeções não-destrutivas disponibilizadas nesta Dissertação de Mestrado: (a) Unidade de captura dos sinais termográficos (<i>Hardware Echo-Therm®</i>); (b) Unidade de processamento dos termogramas (<i>Software Mosaic®</i>) (Adaptado da Ref.47).....	113
Figura 4.8	(a) Disposição espacial dos equipamentos e dispositivos típicos da técnica de <i>shearografia</i> e da peça a ser inspecionada (Placa-Plana (1)); (b) Aquecimento da Peça (1) via iluminação por lâmpadas alógenas para fins de calibração do equipamento de <i>shearografia</i> da Photonita® ...	117
Figura 4.9	Padrão <i>speckle</i> em cores formado em uma superfície plana (Adaptado da Ref.65).....	118
Figura 4.10	Câmara de captura de imagens <i>shearográficas</i> utilizada pela DANTEC®	120
Figura 4.11	(a,b) Amostras materialográficas denominadas respectivamente P1 e P2 preparadas para a verificação da presença e a caracterização óptica/visual <i>in loco</i> de defeitos/danos de manufatura em peças laminadas compósitas de grau aeronáutico (revestimentos - setas verdes – com nervuras - setas amarelas).....	121
Figura 5.1	(a,b) Dois posicionamentos consecutivos do transdutor ultrassônico ao longo do comprimento do raio de curvatura principal do Perfil-U (2).....	124
Figura 5.2	(a) Tela <i>A-Scan</i> correspondente ao posicionamento do transdutor ultrassônico num determinado local do raio de curvatura do Perfil-U (Peça 2) que é livre de defeitos/danos; (b) Tela <i>A-Scan</i> correspondente ao posicionamento do transdutor ultrassônico em outro local do raio de curvatura do Perfil-U (2), em que está presente uma grande delaminação.....	126
Figura 5.3	Regiões indicadas em amarelo nas quais foram detectados defeitos/danos de manufatura do tipo delaminação (separação entre lâminas individuais) das peças compósitas: (a) Placa-Plana (1); (b)	

	Perfil-U (2); (c) Bordo de Ataque I (3).....	127
Figura 5.4	Resultados de inspeção US- <i>squirter</i> da Placa-Plana (1) para dois níveis distintos de sensibilidade do equipamento operando numa frequência de 1 MHz: (a) 40 dB; (b) 53 dB.....	129
Figura 5.5	Resultados de inspeção US- <i>squirter</i> da Nervura em Cruz (5) para quatro níveis (decrecentes) de sensibilidade de detecção da intensidade dos ultrasons pelo equipamento.....	132
Figura 5.6	Resultados de inspeção US <i>Phased-Array</i> na Placa-Plana (1): (a) Sinais típicos de integridade da placa subjacente ao transdutor, mostrados na forma <i>A-scan</i> , à esquerda da tela, e <i>C-scan</i> , à direita; (b) Descontinuidade do sinal (interior do círculo tracejado vermelho) decorrente da presença de uma delaminação na posição inspecionada da placa compósita.....	134
Figura 5.7	(a-d) Resultados diversos de inspeção radiográfica por filmes do Bordo de Ataque I (3) obtidos através da mudança de algumas variáveis de ensaio. A seta amarela indica a existência de uma região de não continuidade da fase de reforço no ápice do bordo de ataque.....	136
Figura 5.8	Resultados de inspeção radiográfica por filmes do Perfil-U (2) obtidos através da mudança de algumas variáveis de ensaio (voltagem e sentido de incidência do feixe).....	138
Figura 5.9	Resultados da inspeção radiográfica por filmes do Bordo de Ataque II (6), obtidos através da mudança de algumas variáveis de ensaio, tais como comentadas no texto.....	139
Figura 5.10	Resultados considerados bem-sucedidos pela Embraer S.A. quanto à inspeção não-destrutiva radiográfica por filmes do Bordo de Ataque II (6): (a) Vista geral; (b) Maior detalhamento.....	141
Figura 5.11	Resultado de inspeção por Radiografia Digital 2D da curvatura principal do Perfil-U (2).....	143
Figura 5.12	(a) Resultado da inspeção da Nervura Cruzada do Profundo (5) por intermédio de Radiografia Computadorizada 2D; (b) Mapeamento tridimensional da peça.....	143

Figura 5.13	Resultado da inspeção por Radiografia Digital Tomográfica 3D da região central da Nervura Cruzada Co-Curada do Profundor, manufaturada com pre-pregs carbono-epóxi.....	144
Figura 5.14	(a) Um dos inúmeros planos tomográficos 2D que deu origem à Figura 5.13; (b) Imagem ampliada (região destacada no quadrado tracejado amarelo).....	145
Figura 5.15	(a) Pannel laminado compósito plano, e (b) Resultados obtidos por termografia pulsada aplicada à Placa-Plana (1) contendo três defeitos propositalmente criados na peça.....	147
Figura 5.16	(a) Duas vistas da Peça-2 avaliada, e (b) Imagem termográfica obtida para o Perfil-U (2). Somente a curvatura principal é indicada na figura.....	148
Figura 5.17	(a) Imagem do Bordo de Ataque (3) indicando-se as posições mais críticas do componente, e (b) Resultados de termografia infravermelha (termogramas) obtidos nestas várias regiões da peça.....	150
Figura 5.18	Imagens termográficas (a,b) e de observação visual (c,d) obtidas para a peça Bordo de Ataque I (3) (a,c) Face 1, (b,d) Face 2. Note a correspondência perfeita com a Figura 5.17.....	151
Figura 5.19	(a,b) Caracterização visual da amostra e dos defeitos internos em peça extraída de um tanque de combustível aeronáutico, e (c) Delineamento de defeito tipo vazios planares em determinado tempo de inspeção térmica de acordo com escala cromática de calibração.....	152
Figura 5.20	Imagem resultante do ensaio de <i>shearografia</i> da Placa-Plana (1) realizada no Brasil pela empresa Photonita®	155
Figura 5.21	Imagens resultantes do ensaio de <i>shearografia</i> do Perfil-U (2) realizado no Brasil, para duas faces de incidência das luzes alógena e laser. Em (a) a seta vermelha indica o sentido de observação adotado em (b).....	156
Figura 5.22	Imagem resultante do ensaio de <i>shearografia</i> do Bordo de Ataque I (3) realizado no Brasil: (a) Face superior (b) Face inferior do componente.....	157
Figura 5.23	Imagens resultantes de ensaios adicionais de <i>shearografia</i> conduzidos para o Perfil-U (2) em uma empresa genuinamente Brasileira: (a) = (b), e (c) = (d), exceto pelo uso de contrastes diferenciados para tentar melhor evidenciar a presença de danos/defeitos.....	159

Figura 5.24	Imagens resultantes de END complementares de <i>shearografia</i> conduzidos para o Bordo-Ataque I (3) numa empresa genuinamente Brasileira: (a) Região próxima à nervura secundária; (b) e (c) Região próxima à nervura principal. (b) = (c) exceto pelo uso de contrastes diferenciados para tentar melhor evidenciar a presença de danos/defeitos.....	162
Figura 5.25	Imagem resultante de ensaio <i>shearográfico</i> conduzido por empresa alemã no Perfil-U (2), indicando um defeito / dano externo (setado em amarelo) que já era perceptível a olho nu.....	165
Figura 5.26	Imagem resultante de ensaio <i>shearográfico</i> conduzido por empresa alemã no Perfil-U (2), indicando a provável presença de delaminação/falha de adesão numa das curvaturas da peça.....	166
Figura 5.27	(a,b) Imagens resultantes de ensaio <i>shearográfico</i> conduzido por empresa alemã no Perfil-U (2), reforçando o diagnóstico de provável presença de delaminação/falta de adesão nas regiões de curvatura da peça circundadas por elipses tracejadas vermelhas.....	167
Figura 5.28	Imagens estereoscópicas obtidas a partir de amostras materialográficas preparadas para a verificação da presença e caracterização <i>in loco</i> de defeitos/danos de manufatura em peças laminadas compósitas de grau aeronáutico: (a,b) Revestimento com nervura P1; (c,d) Revestimento com nervura P2.....	169
Figura 5.29	Imagens capturadas em microscópio óptico de bancada a partir das amostras materialográficas denominadas P1 e P2 preparadas para a verificação da presença e caracterização <i>in loco</i> de defeitos/danos de manufatura em peças laminadas compósitas de grau aeronáutico: (a-c) Regiões depletadas de fibras no revestimento com nervura P1; (d-f) Camada externa polimérica espessa contendo bolhas aprisionadas no processo de cura do revestimento com nervura P2; (g) Trincamento de longo alcance na alma da junção co-curada do revestimento com nervura P1.....	171
Figura 5.30	(a) Amostras P1 e P2 submetidas a inspeções complementares US pulso-eco manual convencional de contato, indicando-se, com traços azuis (apontados por setas vermelhas), as posições na face inferior dos revestimentos, situadas logo abaixo das respectivas nervuras, em que se detectaram defeitos do tipo separação entre camadas	

	(delaminações/falha de adesão); (b,c) Detalhamento das amostras P1 (b) e P2 (c) em que as setas verdes indicam o plano metalográfico analisado e exibido nas Figuras 5.28 e 5.29, e as setas azuis claras apontam para o plano paralelo oposto das amostras.....	176
Figura 5.31	Imagem capturada em microscópio óptico de bancada a partir da amostra materialográfica P1 re-embutida em resina poliéster para observação de seção transversal oposta àquela originalmente avaliada e cujos resultados foram apresentados nas Figuras 5.28 e 5.29.....	177
Figura 5.32	Esquema-resumo mostrando a incongruência entre os resultados de END obtidos por intermédio de inspeção por ultrasonografia pulso-eco na modalidade convencional com varredura executada em modo manual.....	178
Figura 5.33	Ampliação das imagens de áreas destacadas em linhas tracejadas amarelas na Fig. 5.31: (a) Trinca não detectada por ultrasonografia; (b) Detectada.....	180
Figura 5.34	(a) Imagem capturada em microscópio óptico de bancada a partir da amostra materialográfica P2 re-embutida cuidadosamente em resina poliéster para observação da seção transversal diametralmente oposta àquela originalmente avaliada e cujos resultados foram apresentados em algumas das Figs. 5.29. A seta vermelha indica a direção e sentido de injeção de ondas ultrasônicas durante a inspeção END do componente.....	182

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Relação entre temperatura e coloração de um corpo negro (Adaptado da Ref.39).....	76
Tabela 3.1	Propriedades mecânicas básicas em flexão lenta sob três pontos do laminado C-EPX (Fig. 3.2) à temperatura ambiente. Média aritmética de três espécimes ensaiados. A dureza e a densidade do laminado são também reportadas (Adaptado da Ref.64).....	93
Tabela 3.2	Relação dos Padrões que foram submetidos aos ensaios de END empregados	95
Tabela 4.6	Resumo dos Ensaios Realizados	122

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ASTM American Society for Testing and Materials

c Velocidade da luz

CCD Charge-Coupled Device

CEMB Código Interno Embraer

C-EPX Carbono-Epóxi

CTA Centro Tecnológico Aeronáutico

DGEBA Diglicidil Éter de Bisfenol A

e Número de Euler

E Emissor

EM Exame Materiaológico

END Ensaios Não-Destrutivos

ERJ Embraer Regional Jet

EUA Estados Unidos da America

GE General Electric

h Constante de Planck

I Radiância espectral

k Constante de Boltzmann

MIL Military

P1, P2 Designação de peças inspecionadas

P Pressão

R Receptor

RX Radiografia de Raios-X

SAE Society of Automotive Engineers

SHR *Shearografia*

T Temperatura

T Temperatura do corpo negro

TIV Termografia InfraVermelha

TRC Tubo de Raios Catódicos

TWI Thermal Wave Imaging

US Ultrasom

V Vácuo

ΔT Intervalo de temperaturas

ν Freqüência

2D Bi-dimensional

3D Tri-dimensional

6σ Conjunto de práticas administrativas

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	28
1.1 Considerações Iniciais.....	28
1.2 Objetivo desta Dissertação de Mestrado.....	29
1.3 Motivação para o Estudo.....	29
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	30
2.1 Laminados Compósitos Poliméricos de Grau Aeronáutico.....	30
<i>2.1.1 Considerações Iniciais.....</i>	<i>30</i>
<i>2.1.2 Laminados Compósitos Sólidos (Rígidos ou Monolíticos).....</i>	<i>31</i>
<i>2.1.3 Matrizes Poliméricas.....</i>	<i>32</i>
2.1.3.1 Resina Epóxi.....	33
<i>2.1.4 Fibras de Reforço.....</i>	<i>35</i>
<i>2.1.5 Pré-Impregnados (Pré-Pregs).....</i>	<i>37</i>
<i>2.1.6 Bolsa de Vácuo.....</i>	<i>38</i>
<i>2.1.7 Cura em Autoclave.....</i>	<i>40</i>
2.2 Danos e Defeitos em Laminados Compósitos Sólidos.....	43
<i>2.2.1 Considerações Iniciais.....</i>	<i>43</i>
<i>2.2.2 Defeitos.....</i>	<i>43</i>
<i>2.2.3 Danos.....</i>	<i>44</i>
2.3 Princípios Básicos dos Ensaio Não-Destrutivos (END).....	45
<i>2.3.1 Considerações Iniciais.....</i>	<i>45</i>
<i>2.3.2 Ensaio Ultrassônicos.....</i>	<i>45</i>
2.3.2.1 Considerações Iniciais.....	45
2.3.2.2 Varredura Tipo-A.....	54
2.3.2.3 Varredura Tipo-B.....	54

2.3.2.4 Varredura Tipo-C.....	55
2.3.2.5 A Técnica <i>Phased-Array</i>	58
2.3.3 <i>Radiografia de Raios-X</i>	60
2.3.3.1 Considerações Iniciais.....	60
2.3.3.2 Geração de Raios-X.....	61
2.3.3.3 Operacionalização da Técnica Radiográfica.....	63
2.3.3.4 Efeito da Orientação do Defeito/Dano e Outras Limitações.....	65
2.3.3.5 Filmes e Fontes.....	68
2.3.4 <i>Termografia Infravermelha</i>	72
2.3.4.1 Considerações Iniciais.....	72
2.3.4.2 Formas de Medição.....	76
2.3.4.3 Vantagens da Termografia Infravermelha.....	81
2.3.4.4 Desvantagens da Termografia Infravermelha.....	82
2.3.5 <i>Shearografia</i>	82
2.3.5.1 Considerações Iniciais.....	82
2.3.5.2 Princípios de <i>Shearografia</i>	83
2.3.5.3 Equipamentos de <i>Shearografia</i>	86
2.3.5.4 Vantagens da Técnica <i>Shearográfica</i>	89
3. MATERIAL E CORPOS-DE-PROVA.....	91
3.1 Laminados Compósitos Poliméricos.....	91
3.1.1 <i>Considerações Iniciais</i>	91
3.1.2 <i>Laminado Carbono-Epóxi</i>	91
3.2 Peças Submetidas às Inspeções Não-Destrutivas.....	94
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	101
4.1 Inspeções Ultrasônicas.....	101

4.1.1	<i>Considerações Iniciais</i>	101
4.1.2	<i>Calibração e Inspeção</i>	102
4.1.2.1	US Pulso-Eco de Contato Convencional.....	102
4.1.2.2	US por Transmissão- <i>Squirter</i>	105
4.1.2.3	US Pulso-Eco de Contato <i>Phased-Array</i>	107
4.2	Inspeções Radiográficas por Raios-X	109
4.2.1	<i>Considerações Iniciais</i>	109
4.2.2	<i>Calibração e Inspeção</i>	109
4.2.2.1	Radiografia Convencional (por Filmes).....	109
4.2.2.2	Radiografia Digital 2D e Tomografia Computadorizada 3D.....	111
4.3	Inspeção Termográfica Pulsada (<i>Flash</i>)	112
4.3.1	<i>Considerações Iniciais</i>	112
4.3.2	<i>Calibração e Inspeção</i>	113
4.4	Inspeção <i>Shearográfica</i>	115
4.4.1	<i>Considerações Iniciais</i>	115
4.4.2	<i>Calibração e Inspeção</i>	116
4.4.2.1	No Brasil (Photonita Metrologia Optica®).....	116
4.4.2.2	No Exterior (Dantec Dynamics® GmbH - Alemanha).....	119
4.5	Inspeção Materialográfica	120
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	123
5.1	Considerações gerais	123
5.2	Inspeções Ultrasônicas	123
5.2.1	US Pulso-Eco.....	123
5.2.2	US Transmissão (<i>Squirter</i>).....	128

5.2.3 US Phased-Array.....	133
5.3 Inspeções Radiográficas por Raios-X.....	135
5.3.1 Radiografia Convencional (por Filmes).....	135
5.3.2 Radiografia Digital (2D) e Tomografia	
Computadorizada (3D).....	142
5.4 Inspeção Termográfica Pulsada (Flash).....	146
5.5 Inspeção Shearográfica.....	153
5.5.1 Considerações iniciais.....	153
5.5.2 No Brasil.....	154
5.5.3 No Exterior (Alemanha).....	164
5.6 Inspeção Materialográfica.....	168
6. CONCLUSÕES.....	183
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	185
REFERÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Materiais compósitos artificiais podem ser definidos como materiais produzidos através da mistura física, racional, volumétrica, de dois ou mais materiais ou microestruturas, que diferem na forma, composição química e arranjo estrutural, possuem interfaces bem definidas e são insolúveis entre si [ASKELAND D.R. (1994)].

Uma classificação geral dos diversos tipos de materiais compósitos é fornecida na Figura 1.1. Dentre os vários tipos de compósitos destaca-se a classe dos laminados rígidos (denominados também laminados sólidos ou monolíticos – vide elipse verde na Fig. 1.1) empregados na confecção de elementos estruturais de elevado desempenho mecânico [DOT-FAA-AR 02-110 (2003)].

Figura 1.1 Classificação dos materiais compósitos artificiais (Adaptado da Ref.1).

Ensaio não-destrutivo como END são um conjunto de técnicas que possibilitam a análise, a inspeção e a caracterização de materiais,

componentes e estruturas, sem qualquer prejuízo da sua utilidade e funcionalidade futuras ^[MALDAGUE X. (2001)].

1.2 Objetivo desta Dissertação de Mestrado

Intenciona-se comparar o potencial de indicação, de qualificação (ou de identificação), e de quantificação de danos e defeitos gerados nas etapas de manufatura ou manutenção periódica de elementos estruturais aeronáuticos laminados confeccionados em material compósito de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas de carbono, de diferentes técnicas END convencionais (Ultrasonografia e Radiografia) e avançadas (Termografia Infravermelha, *Shearografia* e Tomografia Computadorizada).

1.3 Motivação para o Estudo

A despeito de os laminados compósitos aeronáuticos serem considerados materiais mais tolerantes a danos do que as tradicionais ligas metálicas, o atual emprego em larga escala dos compósitos fibrosos nas aeronaves mais modernas não excluiu a necessidade do emprego dos END, seja na etapa de manufatura, para assegurar a qualidade do elemento estrutural recém-fabricado, ou durante os cheques periódicos de manutenção a que estão sujeitos os veículos aéreos.

Levando-se também em conta que os projetos estruturais compósitos mais evoluídos se baseiam no conceito de tolerância a danos, há necessariamente de se desenvolverem e implementarem técnicas END cada vez mais práticas, rápidas e eficientes que permitam assegurar do modo mais simples possível o alto desempenho e elevada confiabilidade das aeronaves mais modernas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Laminados Compósitos Poliméricos de Grau Aeronáutico

2.1.1 Considerações Iniciais

Conforme mostra a Figura 2.1, a utilização de materiais compósitos na indústria da construção aeronáutica comercial tem sido exponencialmente ampliada nos 15 últimos anos.

Figura 2.1 Evolução do emprego estrutural (% em massa) dos materiais compósitos na indústria de construção aeronáutica civil, para aeronaves de médio e grande portes (Adaptado da Ref.4).

Exemplo típico desta nova era dos materiais aeronáuticos é a recentemente lançada aeronave Boeing 787, cujo percentual em massa de compósitos poliméricos nas suas estruturas primárias e secundárias alcançou a cifra sem precedentes de 54% (Fig. 2.2).

Considerada a relativamente baixa densidade dos laminados compósitos de matriz polimérica fortalecidos com fibras contínuas poliméricas ou cerâmicas, se comparada a das ligas metálicas tradicionais (particularmente

os aços e as superligas), conclui-se que o percentual em volume ocupado pelos polímeros reforçados nestes novos veículos aéreos é extraordinário.

Figura 2.2 Utilização externa de materiais de construção na aeronave Boeing Dreamliner 787 (Adaptado da Ref.5).

Projeta-se que a substituição de ligas metálicas tradicionais por compósitos poliméricos estruturais, além de proporcionar a redução de peso do veículo (com o conseqüente aumento da carga paga - dentre mercadorias e passageiros transportados), de possibilitar a economia de combustível e a redução da motorização (contribuindo para a minimização da poluição ambiental), bem como de estender a autonomia de vôo, permita uma redução do custo final dos componentes da ordem de até 25% [RESENDE-BOTELHO(2000)].

2.1.2 Laminados Compósitos Sólidos (Rígidos ou Monolíticos)

Os laminados compósitos sólidos de matriz polimérica avançadas, especialmente aqueles reforçados com fibras de carbono, que exigem ótimas

propriedades específicas (elevada razão propriedade / densidade) em termos de resistência mecânica e rigidez, um notável desempenho sob fadiga, relativamente elevada temperatura máxima de operação em serviço, uma boa resistência química a solventes em geral, e 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.

2.1.3 Matrizes Poliméricas

Num compósito reforçado por fibras, estas são idealmente completamente envolvidas pela matriz polimérica, que proporciona desta forma proteção e suporte mecânico à fase fibrosa, seu isolamento contra agentes agressivos externos, além de garantir a transferência integral das tensões aplicadas ao componente para o elemento de reforço por meio de atrito e/ou por adesão, o que ocorre através da interface (ou interfase) matriz/fibra.

As matrizes utilizadas em polímeros reforçados com fibras são constituídas por resinas termorrígidas ou polímeros termoplásticos, os quais devem apresentar boa compatibilidade química e térmica com a fibra.

As resinas termorrígidas, ou termofixas, são aquelas em que a cura ou reticulação (reação química irreversível, na qual as cadeias poliméricas são interligadas umas às outras por ligações primárias covalentes) é feita pela ação do calor, via catalisadores ou meios fotônicos, formando um produto final infusível e insolúvel ^[FIORELLI (2000)]. Exemplos de resinas termorrígidas são a poliéster, as éster-vinílicas, uretana metacrilato, a fenol-formaldeído, bismaleimida, e a mais famosa dentre todas, a epóxi.

Já os polímeros termoplásticos não sofrem o processo de cura, e, portanto, podem ser fundidos e conformados por meio da aplicação simultânea de temperatura e pressão, tornando a se solidificarem ao serem resfriados,

num processo que pode ser repetido por várias vezes ^[7]. Exemplos destes polímeros termo-formáveis são o polipropileno, poliamidas, o poli-éter-éter-cetona, poli-sulfeto de fenileno, poli-éter-cetona-cetona, o poli-éter-imida, dentre outros.

A resina epóxi é ainda a matriz polimérica mais empregada na indústria aeronáutica por apresentar um ótimo balanço de propriedades mecânicas e térmicas e excelente processabilidade, não obstante haja uma crescente tendência na utilização de matrizes poliméricas termofixáveis, dadas algumas vantagens inerentes dos termoplásticos sobre as resinas termofixas.

2.1.3.1 Resina Epóxi

A primeira resina epóxi produzida em nível comercial em 1939, produto da reação entre a Epicloridrina e o Bisfenol, foi denominada Diglicidil Éter de Bisfenol A (DGEBA), cuja fórmula estrutural é fornecida na Figura 2.3.

Figura 2.3 Estruturas básicas das moléculas reagentes e do produto final epóxi DGEBA ^[8].

A excelência do emprego das resinas epóxi na forma de matriz em compósitos fibrosos está diretamente associada à elevada adesão/interação matriz/fibra proporcionada por este tipo de resina, como consequência da grande polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas freqüentemente presentes na cadeia da resina inicial e na rede do sistema final já curado [RUSHING, CASSIDY (1994)]

As principais características positivas das resinas epóxi são [www.ides.com (Dez2009)].

- ✦ Baixa viscosidade;
- ✦ Boa resistência química;
- ✦ Boa resistência à corrosão;
- ✦ Boa resistência ao choque térmico;
- ✦ Boa estabilidade dimensional;
- ✦ Boa estabilidade térmica;
- ✦ Alta resistência mecânica;
- ✦ Boa resistência ao impacto (quando tenacificada);
- ✦ Melhor balanço de propriedades dentre os termorrígidos;
- ✦ Aplicabilidade geral.

Seus pontos negativos podem ser assim enumerados [www.ides.com (Dez2009)].

- ✓ Baixa estabilidade oxidativa;
- ✓ Alguma sensibilidade à umidade;
- ✓ Estabilidade térmica limitada a 170-220 °C;
- ✓ Tenacidade intrinsecamente baixa;
- ✓ Graus especiais são relativamente caros.

Os desenvolvimentos mais recentes relativos às resinas epóxi, visando minimizar sua intrinsecamente baixa tenacidade à fratura em ambos os regimes de carregamento estático e dinâmico (impacto), incluem as novas formulações tenacificadoras contendo modificadores elastoméricos e/ou termoplásticos os quais podem ser química ou fisicamente incorporados à matriz epoxídica.

2.1.4 Fibras de Reforço

As fibras de reforço, ou de fortalecimento da matriz têm como funções principais fornecer resistência mecânica e rigidez ao compósito. Estas propriedades variam em função do tipo, tamanho, percentual e da disposição (orientação espacial) das mesmas na matriz polimérica. A escolha da fibra a ser empregada em determinada situação depende do tipo de componente estrutural, do grau de solicitação mecânica e das condições ambientais a que será exposto o compósito em situação real de serviço.

Como reforços estruturais, além das fibras de carbono podem ser utilizada também as de vidro e de aramida, sejam elas empregadas individualmente ou então de forma combinada (compósitos híbridos), visando neste último caso a compensação das deficiências de uma ou outra fibra utilizada. Como exemplo clássico, fibras de vidro com adequada resistência ao impacto e à tração podem ser combinadas às fibras de carbono, as quais tipicamente exibem alto módulo de elasticidade e elevada resistência mecânica, no reforço de compósitos poliméricos. Desta forma, as fibras de carbono exercem sua função estrutural primária provendo resistência e rigidez ao componente estrutural, enquanto as fibras de vidro, além de proverem boa resistência a cargas dinâmicas, atuarão como elemento de tolerância a danos caso as fibras de carbono sejam eventualmente rompidas após a sua relativamente baixa deformação para fratura seja excedida.

As fibras mais comuns podem ser curtas ou longas, com comprimentos tipicamente de 01 mm a 50 mm, com diâmetros variando de 7 a 25 μm .

Para aplicações estruturais de elevada responsabilidade empregam-se exclusivamente as chamadas fibras contínuas, as quais podem ser fornecidas na forma unidirecional (fita), bidirecional (tecido), ou mesmo tridirecional (*braids*). A Figura 2.4 mostra arranjos do tipo tecido bidirecional (0/90°), empregando-se fibras contínuas, para as três classes principais de fibras acima mencionadas: carbono, vidro e aramida. Em todos os casos ilustrados, o trançamento dos feixes de múltiplos de milhares de fibras ou filamentos é do tipo trama simples (*plain-weave*).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 2.4 Tecidos na forma de trama simples de fibras sintéticas: (a) Carbono; (b) Vidro; (c) Aramida; (d) Fibras sintéticas comparadas a um fio de cabelo. Observe o palito de fósforo empregado como referência nas três primeiras fotos acima (Adaptado da Ref.11).

A Figura 2.5a mostra em detalhes um vista de topo do arranjo de fibras de vidro segundo a trama mais simples (*plain-weave*), enquanto a Figura 2.5b mostra uma vista em corte da correspondente seção transversal, em que se observam as fibras nas orientações 0 e 90°, bem como a matriz de resina epóxi (fase preta) que envolve completamente o reforço fibroso.

Figura 2.5 (a) Vista superior da trama de um tecido bidirecional 0/90 de fibras contínuas de vidro; (b) Vista em corte da seção transversal (Adaptado de Ref.1).

2.1.5 Pré-Impregnados (*Pré-Pregs*)

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas são, em geral, utilizados na forma de laminados sólidos (mesmo quando eles compõem os chamados painéis sanduíche estruturais – classe indicada na Fig. 1.1 com uma elipse tracejada na cor magenta), os quais podem ser fabricados como placas planas, ou curvas, constituídas pelo empilhamento e a subsequente consolidação de duas ou mais lâminas individuais do material. Nos compósitos estruturais as fibras fortalecedoras contínuas estão, em geral, na forma de fitas unidirecionais ou de tecidos bidirecionais, mas, em quaisquer dos casos, no produto final, as fibras geralmente obedecem 4 orientações preferenciais, quais sejam, 0°, +45°, -45° e 90°, conforme exemplificado na Figura 2.6.

Figura 2.6 Esquemático da arquitetura básica de camadas individuais de um laminado fibroso cuja seqüência de empilhamento das lâminas individuais, na forma de fitas unidirecionais, é $[(0/90), (+45/-45)_2, (0/90)]$ (Adaptado da Ref.12).

As lâminas individuais do material compósito que darão origem ao laminado após as operações de empilhamento e subsequente consolidação são, em geral, fornecidas na forma de folhas pré-impregnadas (pre-pregs), as quais são combinações das fibras de reforço e da matriz polimérica em uma condição já pronta para a fabricação (Fig. 2.7). No caso das matrizes termorrígidas, a resina está apenas parcialmente curada (estágio oligomérico, ou estágio B), de modo que a sua viscosidade é relativamente baixa e a consistência é adequada para a conformação do material às eventuais curvaturas do molde.

2.1.6 Bolsa de Vácuo

A moldagem por bolsa de vácuo é um processo no qual o conjunto de lâminas individuais de folhas pré-impregnadas empilhadas é curado sob pressão negativa quando vácuo é gerado no espaço entre o laminado e uma bolsa plástica flexível que o envolve e é selada nas bordas. Neste processo de moldagem as lâminas individuais de pre-preg são empilhadas e arranjadas manualmente no interior do molde, o qual, em geral, é metálico (Fig. 2.8).

Basicamente, os seguintes passos são utilizados no processamento de um laminado compósito polimérico fibroso via bolsa de vácuo:

1. Dispor (empilhar e arranjar adequadamente) as lâminas individuais no interior do molde após empregar anti-aderentes ou desmoldantes;
2. Revestir a pilha de lâminas (que formam o laminado) com tecido absorvedor de excesso de resina, tecido isolante e tecido de ventilação, respectivamente;
3. Envolver todo o conjunto com uma bolsa de vácuo;
4. Selar a bolsa e checar eventuais vazamentos;
5. Aplicar vácuo adequado (que deve ser monitorado em vários pontos da linha) até a consolidação do produto, e mantê-lo (vácuo);
6. Inserir o molde, contendo a peça e ainda envolto na bolsa ativada de vácuo, em um forno/estufa e curar o laminado como requerido à determinada temperatura elevada;
7. Remover do molde a peça definitivamente consolidada e curada.

Figura 2.7 Esquemático de fitas pré-impregnadas (pré-pregs) com fibras de reforço espessas (100 µm de diâmetro) (a), e finas (7-25 µm) (b) (Adaptado das Refs.13,14).

Figura 2.8 Laminação de um composto de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas empregando-se a técnica de bolsa de vácuo (Adaptado das Refs.13 e 14).

Peças fabricadas empregando-se unicamente bolsa de vácuo e cura em forno/estufa convencionais possuem, em geral, baixo conteúdo de fibras fortalecidas e um elevado teor de vazios e bolhas. É um processo de baixo custo de fabricação e emprega ferramental relativamente barato para corridas de produção limitada.

2.1.7 Cura em Autoclave

Quando se deseja a obtenção de laminados compostos de alto desempenho, tal como requeridos pela indústria aeronáutica, utiliza-se o processo de cura em autoclave, no interior da qual temperatura e pressão externa serão concomitantemente aplicadas ao molde que contém a peça compósita, estando o conjunto peça/molde embalado numa bolsa de vácuo

impermeável previamente ativada. Uma autoclave é essencialmente um vaso de pressão internamente aquecido, capaz de operar tipicamente a pressões internas de 2 MPa e temperaturas de até 370 °C (Fig. 2.9). Devido às altas temperaturas na autoclave durante o processamento, a atmosfera no interior do vaso é geralmente purgada quanto à presença de oxigênio, empregando-se na pressurização do sistema um gás inerte, geralmente nitrogênio, prevenindo assim combustão térmica ou queima dos materiais sendo curados. O ferramental (freqüentemente referido como molde) pode ser formado por uma montagem de mandris ou detalhes estruturais para acomodar geometrias complexas. Ligas metálicas e mesmo compósitos poliméricos podem ser empregados na construção do molde e demais acessórios.

O vácuo aplicado no interior da bolsa plástica impermeável que envolve o conjunto molde/peça comprime as camadas individuais do laminado, ao longo da espessura da peça, contra a parede maciça do molde. O emprego concomitante de certa quantidade de calor reduz a viscosidade da resina, além de dar início à reação de cura, e permite que os gases que evoluem durante os estágios iniciais da reação química de cura polimérica escapem e não fiquem aprisionados na massa compósita, reduzindo substancialmente o risco de geração de bolhas e vazios. Camadas de tecidos absorvedores e de ventilação sobre o laminado auxiliam na evacuação dos gases. Filmes superficiais e revestimentos no interior do molde podem ser alocados de forma a melhorar o acabamento superficial da peça moldada e curada.

Em determinado momento do ciclo vácuo x temperatura x pressão (Fig. 2.10), a pressão interna da autoclave é incrementada e atua sinergicamente ao vácuo no interior da bolsa, incrementando sobremaneira o efeito de compressão entre as lâminas individuais, garantindo elevados graus de consolidação do produto final. O controle da espessura local e da qualidade do produto acabado pode ser conseguido por intermédio do emprego de placas rígidas (*caul plates*) e intensificadores incorporados sob a bolsa de vácuo.

Em alguns casos, componentes pré e/ou parcialmente curados podem ser respectivamente co-colados ou co-curados ao material laminado sendo processado no interior da autoclave.

Figura 2.9 Esquemática de uma autoclave empregada na manufatura de peças compósitas laminadas e embaladas em bolsa de vácuo (Adaptado das Refs.13 e 14).

Figura 2.10 Ciclo de cura estabelecido em termos de vácuo (V), temperatura (T) e pressão (P), o qual é tipicamente aplicado em produção de peças compósitas de elevada responsabilidade e em grande escala empregando-se bolsa de vácuo simultaneamente à autoclave (Adaptado das Refs. 13 e 14).

2.2 Danos e Defeitos em Laminados Compósitos Sólidos

2.2.1 Considerações Iniciais

Primeiramente há de se partir da diferenciação entre os conceitos de defeito (*defect, flaw*) e dano (*damage*). Defeitos são gerados durante os estágios de manufatura e de reparo dos laminados compósitos (inclusive como decorrência de erros no estágio de projeto/concepção da peça, componente ou estrutura), enquanto que, por sua vez, os danos podem ser criados, além das duas etapas acima, durante os estágios de montagem (embarque na aeronave), em situações de serviço (taxiamento, voo, ou até mesmo com a aeronave estacionada), e durante, e principalmente, as etapas de manutenção e inspeção não-destrutiva da aeronave. De qualquer forma, há de se enfatizar que danos e defeitos comprometem severamente o desempenho mecânico do componente estrutural em serviço [RAY B.C.HANSAN (2009)].

2.2.2 Defeitos

Os defeitos mais comuns nos laminados compósitos podem ser assim listados: número, posicionamento e orientação impróprios de fibras fortalecedoras, fibras onduladas, presença de vincos, gradientes indesejáveis de espessura, seqüência incorreta de empilhamento das camadas ou lâminas individuais, resina incompatível ao sistema compósito, concentradores indesejáveis de tensão, cura imprópria da resina, áreas ricas em resina (ou carentes de fibras), bolhas, vazios, inclusões (papéis 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. [KNOELLER (2009) – LAPLANTE, MARBLE, BANLCOM (2005)].

2.2.3 Danos

Os principais tipos de danos desenvolvidos nesta classe de materiais incluem trincas e delaminações, fibras quebradas, descolamento de fibras da matriz, os quais são gerados particularmente 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, degelantes), a ambientes salinos, oxidativos, úmidos (especialmente sob altas temperaturas), bem como por ação de ciclos térmicos e termomecânicos.

Nestes termos, defeitos e danos podem atuar sinergicamente, no sentido de um defeito causar, ou ao menos facilitar a geração de um dano. Por exemplo, uma colagem mal realizada entre as faces de um núcleo colméia e dos correspondentes laminados sólidos durante a manufatura de um painel sanduíche estrutural há de possibilitar o ingresso de água no interior da estrutura. Esta água causará danos tais como a hidrólise do núcleo polimérico, ou a corrosão da colméia metálica. Isto, sem mencionar os danos decorrentes dos ciclos de congelamento / descongelamento da água no interior do núcleo-colméia, quando a expansão da água por resfriamento nas elevadas altitudes pode causar a ruptura da estrutura celular do núcleo-colméia [KNOLLER S.L. (2009)- LAPLANTE G. (2005)].

A recorrência dos defeitos e danos acima-mencionados em laminados compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas, e suas nefastas conseqüências para a integridade estrutural e, conseqüentemente, para a segurança em voo de veículos aeronáuticos, constituem forte incentivo à alteração, à adaptação, à concepção e ao desenvolvimento de processos de manufatura, bem como, e na mesma medida, de métodos de ensaio ou inspeção não-destrutiva para a detecção, identificação e até mesmo a quantificação de defeitos e danos em peças, componentes, sub-estruturas, detalhes construtivos (ex, juntas) e estruturas integrais. Alguns destes métodos END são descritos detalhadamente nas seções seguintes deste texto.

2.3 Princípios Básicos dos Ensaios Não-Destrutivos (END)

2.3.1 Considerações Iniciais

Vários métodos END vêm sendo propostos, desenvolvidos e adaptados à inspeção de defeitos e danos internos em laminados compósitos sólidos poliméricos.

Os métodos END, juntamente com estudos de mecânica (incluindo a Ciência da Mecânica da Fratura) e ensaios de durabilidade são potencialmente capazes de prever a integridade do material e a confiabilidade estrutural, possibilitando desta forma a priorização do ciclo de reparos na indústria da construção aeronáutica.

Basicamente, quatro tipos de END serão apreciados na presente Dissertação de Mestrado, 2 deles mais tradicionais (Ultrassom e Radiografia de raios-X), e outros 2 mais avançados (Termografia Infravermelha e *Shearografia*).

São avaliadas as potencialidades de uso destas técnicas na caracterização de alguns defeitos originados durante a manufatura de peças estruturais compósitas de emprego aeronáutico, bem como na inspeção de danos potencialmente criados na etapa de fabricação de laminados rígidos compósitos poliméricos, ou então durante o seu uso em condições de serviço.

2.3.2 Ensaios Ultrassônicos

2.3.2.1 Considerações Iniciais

Ultrassom é energia acústica (som) na forma de ondas elasto-mecânicas que se propagam em meio físico e cuja frequência de vibração estão acima do limite superior de detecção pelo ouvido humano. Os métodos ultrassônicos são

poderosas ferramentas para inspeção não-destrutiva e são amplamente empregados na indústria devido às altas resoluções possíveis dependendo da frequência selecionada (100 kHz to 40 MHz). Nos ensaios ultrasônicos, ondas de tensão são injetadas no material ou componente a ser examinado (Fig. 2.11) e, então, os feixes que são ou transmitidos, ou refletidos pelas descontinuidades geométricas, pelos defeitos, danos, pelas não-homogeneidades micro e macro-estruturais, pelas interfaces, dentre outros fatores, devem ser monitorados e interpretados. As medidas são relativamente fáceis de serem realizadas com os equipamentos comercialmente disponíveis [WORLEY, LIAW, BENSON R.S. (1996)].

Ensaio não-destrutivo ultrasônico utiliza em geral pulsos ultrasônicos na faixa dos 2.25 aos 10 MHz. Os métodos ultrasônicos são geralmente divididos em técnicas de contato e de imersão (parcial ou total), e podem ser subdivididos nos modos pulso-eco (ou reflexão) e de transmissão (ou transparência).

Na modalidade pulso-eco (Fig. 2.12) os pulsos são gerados e detectados por um único transdutor mantido em íntimo contato com a superfície da peça inspecionada, através de um agente de acoplamento na forma líquida ou em gel. Os pulsos viajam internamente através da peça e ecos, ou reflexões ocorrem a cada mudança no material encontrada pela frente de onda elasto-mecânica. Num material laminado compósito as delaminações, ou o descolamento entre as lâminas ou camadas individuais, atuam facilmente como agentes refletores das ondas ultrasônicas, gerando um eco característico. Os pulsos refletidos, ou os ecos são detectados pelo mesmo transdutor, que age simultaneamente como emissor e receptor, e os sinais resultantes são monitorados em um tubo de raios catódicos (TRC), possibilitando a indicação, a identificação e mesmo a quantificação dos defeitos que causaram estes ecos. Os sinais tipicamente exibidos no TRC (quais sejam, os ecos de entrada, de presença do defeito e de fundo, isto é, da face posterior da peça) variam em forma e em duração. O intervalo de tempo decorrido entre o pulso de iniciação (de injeção, ou de entrada da onda elástica no objeto sob inspeção), que é liberado pelo módulo de emissão do transdutor, e o retorno deste pulso ao módulo de recepção, que está contido no mesmo

transdutor, após o eco gerado pelo defeito pode ser eletronicamente apresentado como uma leitura da profundidade do defeito ou dano, o que constitui numa grande vantagem da técnica de reflexão [SIM J.K., IM K.H. (2006)].

Figura 2.11 Modelo simplificado da injeção de ondas acústicas (som) em um meio sólido e sua propagação longitudinal por vibração dos elementos que compõem o reticulado cristalino formado, no caso, por átomos (Adaptado da Ref.1).

Na Figura 2.13 são mostrados os sinais de eco ultrasônico obtidos em um laminado compósito exibindo três delaminações internas (indicadas por setas azuis) que refletem a onda injetada em uma de suas faces ou superfícies da peça.

Os picos inicial e final (setas verdes) correspondem, respectivamente, aos ecos de entrada do feixe na superfície inspecionada e de reflexão na superfície de fundo, ou seja, a superfície oposta à primeira. Nota-se a perda significativa de energia (associada à altura dos picos de reflexão), na medida em que os ecos são gerados nas múltiplas delaminações subsequências.

Já na inspeção ultrasônica por transparência os pulsos são gerados pelo transdutor de transmissão, o qual é acoplado diretamente à superfície da

peça por um agente acoplante, pela imersão do conjunto em um banho de água, ou ainda por meio de jatos de colunas d'água (*squitter*). O pulso sônico entra na peça e a atravessa até o lado oposto, sendo detectado pelo transdutor de recepção, o qual é acoplado ao outro lado da peça exatamente como é o receptor (Fig. 2.14). Defeitos e danos detectáveis bloquearão, ou reduzirão a transmissão do som, e isso causará uma redução proporcional na amplitude do sinal capturado pelo receptor, dando uma medida da gravidade dos mesmos.

Figura 2.12 Princípio da ultrasonografia pulso-eco: círculos tracejados indicam o defeito presente na peça, e a seta verde aponta o pico de reflexão (eco) da onda ultrasônica gerado pela sua interação como o defeito (Adaptado da Ref.22).

Figura 2.13 Ecos devidos à presença de várias delaminações em seqüência ao longo da espessura de um laminado compósito (setas azuis) (Adaptado da Ref.22).

Portanto, o sistema assim configurado somente poderá distinguir entre uma peça defeituosa/danificada, ou não, e não será capaz de gerar informações acerca da profundidade do defeito, ou seja, seu posicionamento ao longo da espessura da peça. Além disso, na técnica ultrasônica por transmissão a peça é geralmente removida da montagem ou do conjunto geral ao qual pertence, de modo a se ter um acesso irrestrito a ambas as faces (frontal e posterior) da mesma, o que também constitui uma desvantagem operacional perante a técnica concorrente de pulso-eco [SAFAEINILI(1996)-HSU,BARNARD (2006)]

O transdutor é uma parte essencial do sistema de instrumentação ultrasônica. Ele incorpora um elemento piezelétrico (Fig. 2.15), o qual converte pulsos elétricos em vibração mecânica (efeito que ocorre no modo emissão, e, a rigor, consiste no efeito piezelétrico inverso), bem como vibrações mecânicas (ou seja, ondas sonoras no caso em questão) em sinais elétricos (o que constitui o verdadeiro efeito piezelétrico). Este último efeito ocorre no recebimento, pelo transdutor, dos sinais ecoados no dano/defeito (técnica pulso-eco), ou então que foram transmitidos através dos mesmos (na técnica de transparência), e que são analisados para fins de caracterização do dano e/ou defeito interno(s) à peça inspecionada.

Como amplamente reconhecido, cristais piezelétricos possuem a propriedade de alterarem seu tamanho quando uma voltagem elétrica lhes é aplicada. Desta forma, a aplicação de uma corrente alternada os força a oscilarem em freqüências muito elevadas produzindo, como consequência, ondas sonoras de elevada freqüência, ou seja, justamente as tão desejáveis ondas ultrasônicas.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 2.14 Princípio da ultrasonografia por transmissão, ou por transparência. Observa-se a maior perda de energia (vide setas respectivamente nas cores amarela e verde) por reflexão do feixe ultrasônico durante a sua interação com o defeito (no interior dos círculos tracejados nas cores amarela e verde, respectivamente), quando se confronta o caso (c,d) ao caso (a,b) (Adaptado da Ref.22).

Da mesma forma, cristais piezelétricos geram voltagem elétrica quando esforço mecânico lhes é imposto, de sorte que o mesmo cristal pode ser empregado como detector ultrasônico. De fato, os transdutores pulso-eco mais modernos empregam dois cristais, cada um executando sua função separada, mas sincronizadamente.

(a)

(b)

Figura 2.15 (a) Componentes individuais de um transdutor ultrasônico; (b) Diversos tipos de transdutores, dispositivos e aparatos empregados em ensaios ultrasonográficos (Adaptado da Ref.26).

A maioria destes novos detectores é confeccionada em material cerâmico tais como titanato de bário, titanato zirconato de chumbo e metaniobato de chumbo. Mais recentemente, filmes poliméricos e transdutores compósitos vêm ganhando espaço e aceitação no mercado dos END. O agente de acoplamento é um material que facilita a transmissão da energia ultrasônica a partir do transdutor para o interior da amostra, e vice-e-versa. Ele é geralmente necessário devido à grande diferença entre as impedâncias acústicas do ar e dos sólidos (tal como o que compõe a amostra). Portanto, na ausência do acoplante a maior parte da energia sônica despejada pelo transdutor é refletida na interface entre o ar (ambiente) e a amostra (sólida), e muito pouco é transmitido para o interior da mesma. O acoplante desloca, ou substitui o ar existente entre a face do transdutor e a superfície do objeto inspecionado, incrementando substancialmente a injeção de energia ultrasônica na amostra defectiva e/ou danificada, de forma que mais energia efetiva e útil do sinal ultrasônico possa ser obtida. Na técnica de contato emprega-se um filme fino de óleo, glicerina ou água entre o transdutor (leia-se transdutores, no caso da técnica de transmissão ou transparência) e a superfície inspecionada. Técnicas bastante recentes, tais como a de ultrassom a *laser* (*laser-ultrasonics*), dispensam o uso de agentes de acoplamento, porém seu estudo está além dos objetivos da presente Dissertação.

Uma modalidade interessante da técnica de ultrassom por transparência é a que utiliza colunas d'água (*squirter*) como meio de transmissão de ondas sônicas entre as superfícies de uma peça e, respectivamente, os transdutores de emissão e recepção de ondas acústicas, tal como esquematiza a Figura 2.16. Mais recentemente, arranjos similares a este têm sido propostos empregando-se jatos de ar em substituição a colunas de água [SAFAEINILI (1996)-HSU,BARNARD (2006)].

Os dados ultrasônicos podem ser coletados e exibidos em diferentes formatos. No mundo dos END, as três formas mais comuns são conhecidas, respectivamente, como apresentações de varreduras (*scans*) dos tipos-A, B e C. Cada modo de apresentação proporciona uma maneira distinta de se observar e se avaliar a região do material sendo inspecionada. Sistemas

computadorizados modernos de varredura ultrasônica podem exibir dados em todas as três formas de apresentação simultaneamente ^[22]

Figura 2.16 (a) Princípio do funcionamento de um *squirter* por transmissão, ou transparência, empregando colunas d'água que atuam como agentes acoplantes para, respectivamente: (b) Transdutores emissor (E) e receptor (R) de ondas acústicas ultrasônicas. Foto gentilmente cedida pela Embraer S.A.

2.3.2.2 Varredura Tipo-A

A apresentação tipo-A exibe a quantidade de energia ultrasônica recebida pelo transdutor como uma função do tempo. A quantidade relativa de energia recebida é plotada no eixo vertical, das ordenadas, e o tempo de deslocamento da energia sônica no interior do material é graficada ao longo do eixo horizontal, das abscissas. A maioria dos instrumentos com modo de exibição de varredura tipo-A permite o sinal ser apresentado em sua forma natural de radiofrequência, como um sinal de radiofrequência completamente retificado, ou ainda como a metade positiva ou negativa do sinal de radiofrequência. Na apresentação de varredura tipo-A, o tamanho relativo de uma descontinuidade pode ser estimado através da comparação da sua amplitude de sinal capturado, mensurada no eixo vertical de energia, com a amplitude gerada por um refletor (dano/defeito) previamente conhecido. A profundidade do agente refletor (dano/defeito) pode ser determinada a partir da posição, no eixo do horizontal do tempo, do máximo sinal de amplitude de energia (pico de reflexão), desde que se conheça previamente a velocidade do som naquele meio em particular, no qual o som se desloca.

2.3.2.3 Varredura Tipo-B

A apresentação tipo-B consiste em vistas em perfil (seções transversais) da amostra inspecionada. Nesta modalidade, o tempo-de-vôo (*time-of-flight*), ou o tempo de deslocamento da energia sônica, é exibido ao longo do eixo vertical e a posição linear do transdutor é exibida ao longo do eixo horizontal. A partir da varredura tipo-B, a profundidade do dano/defeito, assim como as suas dimensões lineares aproximadas na direção da varredura podem ser determinadas. A varredura tipo-B é tipicamente produzida estabelecendo-se um limiar, ou uma janela de disparo na varredura tipo-A, com o transdutor se movendo em linha reta na superfície inspecionada. Sempre que a intensidade do sinal de reflexão é elevada o suficiente para superar o limiar pré-estabelecido, um ponto representando uma parte do dano/defeito é produzido

pela varredura tipo-B, de sorte que um conjunto destes pontos denota a geometria planar da descontinuidade detectada.

2.3.2.4 Varredura Tipo-C

A apresentação tipo-C proporciona uma vista tipo-plana da localização e do tamanho do dano/defeito presente no interior da amostra inspecionada. O plano da imagem é paralelo ao plano de varredura do transdutor. A apresentação tipo-C é gerada com um sistema de aquisição automatizada de dados, tal como um sistema de varredura por imersão, ou via colunas d'água controlado por computador (*squitter*). Tipicamente, uma janela de coleta de dados é estabelecida na varredura tipo-A e a amplitude, ou o tempo-de-vôo do sinal é gravado em intervalos regulares de tempo, enquanto o transdutor é deslocado ao longo da superfície da amostra segundo trajetórias não-lineares. A amplitude relativa do sinal ultrasônico recebido, ou o tempo-de-vôo é mostrada em matizes de cinza ou em colorações variadas para cada posição em que os dados foram gravados. A apresentação da varredura tipo-C proporciona uma imagem bem delineada das peculiaridades geométricas do dano/defeito interno, cujas superfícies refletem e espalham as ondas sonoras.

A Figura 2.17 esquematiza de modo bastante didático as três modalidades de varredura por ultrasonografia acima discutidas quando da inspeção de um laminado contendo uma única delaminação quase-planar.

A Figura 2.18 apresenta uma abordagem mais avançada de imageamento tomográfico de uma amostra contendo várias delaminações posicionadas em diferentes profundidades da peça. Este tipo de análise é proporcionado por um sistema de varredura controlado por computador, operando no modo pulso-eco, com a imersão da peça e do transdutor em um tanque de água. O fatiamento da amostra (método tomográfico) é obtido a partir do processamento simultâneo dos sinais ultrasônicos pertencentes a uma mesma frente de avanço das ondas sônicas, a qual foi emitida em um dado tempo (correspondente a um dado *gate*), refletida no dano/defeito num tempo (profundidade) específico, e retornada subsequente ao receptor.

Figura 2.17 Comparação entre as várias técnicas de varredura ultrasônica: (a) Delaminação (dano ou defeito interno exibindo geometria quase-planar) presente em uma placa laminada compósita; (b) Varredura-Tipo A da descontinuidade (inspeção pontual realizada na superfície da placa laminada, numa posição localizada sobre o dano/defeito interno); (c) Varredura-Tipo B da descontinuidade (inspeção conduzida na superfície da placa laminada, utilizando-se movimento linear do transdutor em regiões situadas sobre o dano/defeito); (d) Varredura-Tipo C da descontinuidade (inspeção executada na superfície da placa laminada, com movimentos não-lineares do transdutor em áreas localizadas sobre o dano/defeito) (Adaptado da Ref.22).

Figura 2.18 (a-c) Varreduras-Tipo C obtidas pela inspeção planar sobre três delaminações criadas por impacto com uma esfera de aço de 12,5 mm de diâmetro (respectivamente 20, 10 e 5 Joules) em um laminado compósito sólido, em três posições distintas (ou seja, três tempos de deslocamento de onda, *time-of-flight*) ao longo da espessura do componente (imageamento tomográfico). Note que a superposição das imagens proverá uma vista tri-dimensional do objeto e dos correspondentes danos (o efeito é conhecido como Varredura-Tipo D). As escalas coloridas correspondem aos níveis de atenuação sônica nas varias regiões dos planos paralelos avaliados. Imagens gentilmente cedidas pela Prof^a. Maria Odila Hilário Cioffi da FEG-Unesp, Guaratingueta-SP.

Os principais danos/defeitos avaliados por ultrassom em laminados compósitos sólidos são os vazios internos, as delaminações (ou falta de adesão) geradas na manufatura, ou aquelas criadas por cargas de impacto, as porosidades e a presença de filmes/papéis colantes de lâminas semi- e pré-impregnadas [SIMJ.K.,HSU D.K.(2006)]. Se os defeitos e/ou danos detectados (indicados), identificados (qualificados) e caracterizados (quantificados) encontram-se fora dos limites permitidos pelas especificações, as peças devem ser prontamente rejeitadas e disponibilizadas ao setor de Engenharia. Esta, por sua vez, pode aceitá-las como estão, ou indicar seu retrabalho ou o seu reparo de modo a se tornarem aceitáveis, ou então sucateá-las.

2.3.2.5 A Técnica *Phased-Array*

Esta técnica ultrasonográfica foi inventada na década de 1980, porém somente agora vem sendo plenamente desenvolvida e aplicada com maior utilidade na indústria aeronáutica, em especial na inspeção dos laminados compósitos rígidos, devido ao relativamente alto custo inicial de aquisição do equipamento e o necessário treinamento de pessoal especializado. Diferentemente da ultrasonografia tradicional, em um mesmo transdutor são alinhados vários cristais piezelétricos, tipicamente 16, 32, 64 ou 128 cristais normalmente chamados de elementos. Com isto, sua área de atuação aumenta consideravelmente em relação ao emprego de um único cristal.

Outra vantagem desta técnica é a de controlar a energia e o ângulo de saída do feixe ultrasônico mesmo com o transdutor mantido em uma posição fixa (Fig. 2.19). Isto é possível através de comandos do programa computacional utilizado no gerenciamento do equipamento de ultrassom, que permitem um controle preciso da emissão do feixe ultrasônico por cada um dos 16 conjuntos de 8 elementos de um transdutor com 128 cristais, por intermédio do estrito controle do intervalo de tempo de disparo do feixe entre cada conjunto de elementos. Com isso, é possível variar amplamente a faixa de varredura da amostra, conseguindo-se inspecionar uma área muito maior num tempo muito mais reduzido [FREEMANTLE,HANKINSON(2005)].

A Figura 2.20 esquematiza as razões pelas quais a varredura pulso-eco *Phased-Array* é muito mais eficiente que um sistema convencional mono-elemento.

Figura 2.19 (a) Esquemático do efeito de ampla varredura obtido com o sistema *phased-array* ultrassônico, que permite uma inspeção mais rápida e efetiva da peça em busca de danos e defeitos com uma mínima movimentação e/ou inclinação do transdutor/receptor (Adaptado da Ref.28).

Figura 2.20 (Continua na próxima página)

(b)

Figura 2.20 (a) Esquematização do potencial de varredura proporcionado pela existência dos 128 elementos transdutores (cristais) no processo *phased-array* em que conjuntos de 8, 16, 32 ou 64 elementos operam simultaneamente de modo complementar, proporcionando um amplo e rápido alcance do feixe ultrassônico a qualquer ponto da peça inspecionada; (b) Comparação entre as trajetórias de varredura empregando-se, respectivamente, um transdutor pulso-eco de um sistema convencional ultrassônico (acima) com um único elemento e um sistema *phased-array* de múltiplos elementos em um único transdutor (abaixo). Grosso modo, no caso em questão, para uma mesma velocidade de varredura linear, o sistema convencional é cerca de 5 vezes mais lento que o *phased-array* (Adaptado da Ref.28).

2.3.3 Radiografia de Raios-X

2.3.3.1 Considerações Iniciais

Ensaio radiográfico é um método não-destrutivo para a inspeção de componentes estruturais na busca de defeitos e danos em que se emprega a habilidade de radiação eletromagnética de alta energia, ou frequência (ou seja, com pequeno comprimento de onda, Fig. 2.21) penetrar vários materiais nas mais diversas espessuras. Esta técnica é mais satisfatória na indicação de defeitos internos não-planares, tais como vazios e porosidades. Entretanto, se

uma orientação adequada (paralela) é conseguida entre a direção de incidência do feixe de radiação ionizante e o plano de uma delaminação em um laminado compósito estrutural, este tipo de defeito de fabricação, ou dano causado, por exemplo, por impacto pode ser adequadamente caracterizado.

Figura 2.21 Comprimentos de onda e correspondentes energias do espectro de radiações eletromagnéticas (Adaptado da Ref.29).

A radiografia de raios-X é efetiva para peças com geometrias complexas, difíceis de serem inspecionadas ultrasonicamente. Entretanto, nos laminados compósitos sólidos de matriz polimérica, freqüentemente há necessidade da intensificação da imagem radiográfica por intermédio do emprego de contrastes, ou líquidos radio-opacos, haja vista a baixa densidade e, conseqüentemente, o baixo coeficiente de atenuação radiográfica dos materiais exibindo baixa densidade que constituem esta classe de materiais estruturais. A técnica é efetiva na detecção de trincas na matriz, orientação de fibras, inclusões, dentre outros defeitos e características dos laminados compósitos rígidos poliméricos [BECKER G.K. (1985)].

2.3.3.2 Geração de Raios-X

Raios-x podem ser produzidos em pacotes discretizados de energia chamados fótons, como a luz visível. Existem dois diferentes processos para a produção de fótons de raios-X, os quais podem ocorrer em átomos pesados, tais como o de tungstênio, material freqüentemente empregado como alvo ou ânodo de um tubo de raios-X, tal como mostrado na Figura 2.22.

Figura 2.22 Tubo de raios x ilustrando o processo de geração da radiação-x ionizante (Adaptado da Ref.1).

Ambos os modos de produção de radiação ionizante envolvem a mudança dos estados eletrônicos. No primeiro deles, a radiação-X é emitida quando um elétron em movimento, projetado contra um alvo de tungstênio, é desacelerado no “choque” com o alvo de elevado peso atômico. O elétron negativamente carregado tem sua velocidade drasticamente reduzida após orbitar em torno de um átomo positivamente carregado de tungstênio. Esta perda de energia produz um espectro contínuo de radiação-X, o qual é empregado, por exemplo, na inspeção não-destrutiva de peças aeronáuticas. Um segundo modo de produção de raios-X envolve a projeção de um elétron acelerado contra um átomo e o suprimento de energia a um elétron deste último que o permita retirá-lo de um nível energético inferior (por exemplo, da camada K) e elevá-lo a um nível superior (por exemplo, para a camada L). Cerca de 0,1 % dos elétrons produzem vacâncias na camada K, e a maioria produz calor. Então, um elétron de tungstênio de um nível energético superior (pertencente a uma camada mais externa da eletrosfera) pode “cair” na camada K, e esta quantidade excedente de energia entre os dois estados eletrônicos aparece como um fóton emitido de raios-X. Este tipo de emissão produz raios-X de maior intensidade que a radiação gerada pela

desaceleração de um elétron pelo núcleo atômico alvo, e o fóton de raios-X da camada K, no exemplo em questão, parte como uma onda eletromagnética de comprimento bem definido. Este fenômeno é bastante empregado na identificação da composição química dos materiais [ASKELAND D.R. (1994)].

2.3.3.3 Operacionalização da Técnica Radiográfica

A Figura 2.23 mostra uma esquematização geral do processo de inspeção radiográfica. A amostra, peça, componente ou corpo de prova é colocado entre a fonte de energia e um filme radiográfico. A energia radiográfica, então, projeta uma imagem de qualquer anormalidade sobre o filme. O filme é posteriormente revelado quimicamente de modo a se obter a imagem (o negativo), e as regiões contendo danos ou defeitos na peça inspecionada aparecerão mais escuras que as regiões íntegras, visto que, neste último caso, mais energia eletromagnética foi absorvida (atenuada) pelo material, diminuindo assim a parcela de energia que correspondentemente atinge e sensibiliza fonicamente o filme.

O mapeamento assim realizado dos danos/defeito é bi-dimensional, de modo que não é possível, ou ao menos viável em termos práticos, identificar a profundidade da descontinuidade interna da peça inspecionada.

Técnicas radiográficas digitais mais avançadas, tal como a tomografia computadorizada, permitem a obtenção detalhada de imagens bi e tri-dimensionais (respectivamente, 2D e 3D) destes danos/defeitos, e vêm sendo rapidamente desenvolvidas e implementadas em ambientes industriais. Entretanto, o ritmo de adoção desta classe de equipamentos pelas empresas é bastante lento em virtude dos elevados investimentos necessários [BUENO C.BARKER, BARRY R.C. (1994)].

O método radiográfico, que se baseia essencialmente na atenuação¹ diferenciada da radiação ionizante pelas diversas partes da peça ou estrutura que está sendo examinada, pode ser empregado, além da detecção, quali e quantificação de seus danos e defeitos, para verificações de diferenças entre densidades de vários materiais constituindo uma mesma peça, ou então formando uma montagem completa. Em adição, ele possibilita identificar variações de espessura e de composição química existentes no conjunto avaliado, registrando-se de forma indelével o resultado na forma de uma imagem radiográfica [ASKELAND D.R. (1994)].

Figura 2.23 Esquematisação da inspeção radiográfica por filmes (radiografia convencional ou analógica) (Adaptado da Ref.1).

¹ Atenuação corresponde à somatória dos efeitos individuais de absorção e de espalhamento da radiação eletromagnética ionizante pela peça sob inspeção, sendo que ambos os efeitos reduzem a quantidade e a energia dos fótons que sensibilizarão o sensor radiográfico (filme, placa ou painel).

Dois dos parâmetros mais importantes que devem ser considerados na escolha de um equipamento de raios-X adequado à uma determinada inspeção radiográfica são: (i) A kilovoltagem (kV), definida como a diferença de potencial entre o catodo e o anodo, que determina a energia da radiação emitida, e, por conseguinte, o seu poder de penetração. A escolha da kV adequada para cada situação não está simplesmente vinculada à obtenção de raios-X suficientemente energéticos para penetrar uma peça, mas também ao contraste da imagem resultante. Por exemplo, kVs mais baixas produzem maiores contrastes; entretanto, reduzidas kVs requerem tempos mais longos de exposição para se produzir uma radiografia satisfatória. Além disso, quanto maior o contraste, menor é o intervalo de espessuras da peça que poderá ser inspecionado durante uma única tomada radiográfica. Conclui-se, portanto, que a seleção da kV é, freqüentemente, uma questão de compromisso entre vários requisitos conflitantes de uma dada inspeção, devendo-se, portanto, buscar uma otimização das variáveis do processo radiográfico; (ii) A corrente elétrica, ou a miliamperagem (mA) do equipamento, que define a intensidade do fluxo de elétrons entre o catodo e o anodo. Por exemplo, correntes altas estão associadas a feixes de raios-X de grande intensidade, e a intensidade da radiação governa o tempo que um filme deve ficar exposto até que se obtenha uma imagem com o índice de qualidade desejado. Desta forma, aumentando-se a mA diminui-se o tempo da exposição a que o filme deve ser submetido, e vice-e-versa [SOARES H.N. (2007)].

2.3.3.4 Efeito da Orientação do Defeito/Dano e Outras Limitações

Em oposição ao método de inspeção ultrasônica visto no item anterior, o máximo desempenho de um sistema radiográfico durante a inspeção de danos ou defeitos planares é verificado quando o feixe de fótons de raios-X incide paralelamente ao plano da descontinuidade, conforme mostra a Figura 2.24. Isto ocorre porque, nestas condições, maior será a distância percorrida pelos fótons na região de menor densidade da peça (ar no interior do defeito) e, portanto, menor será a perda de energia destes fótons até que atinjam o filme

radiográfico, causando-lhe, assim, grande sensibilização fotônica, e proporcionando uma fácil diferenciação com relação às regiões correspondentes à porção íntegra do componente, visto que os fótons que interagem com a matéria sólida estarão muito menos energizados ao atingirem o filme devido a alta atenuação que experimentaram, e, conseqüentemente, pouco sensibilizarão o filme fotográfico.

Além das acima mencionadas limitações da radiografia 2D convencional (por filmes, ou analógica), outras limitações adicionais se impõem à técnica, podendo-se citar: (a) a interpretação e a discriminação dos danos/defeitos são difíceis para peças e componentes com geometrias complexas; (b) requer-se acesso aos dois lados do componente; (c) o filme radiográfico é caro e não re-utilizável, com seu processamento gerando resíduos químicos; (d) Alto custo de compra e de manutenção dos equipamentos devido às rígidas diretrizes e normas de segurança e de saúde [BALASKO M. VERES I, MOLNAR G. (2004) – BURKLE W.S., LEMLE L.P. (1993)]

Figura 2.24 Tubo de raios-X ilustrando o processo de geração da radiação ionizante (Adaptado da Ref.1).

Além disso, vale mencionar que a qualidade final da imagem radiográfica depende fortemente da escolha do filme apropriado, que por sua vez é uma função dos tipos de danos/defeitos, espessura, e material(s) constituinte(s) da peça inspecionada. Não menos importantes são: o diâmetro do foco da fonte, o tempo de exposição, a distância foco-filme, e a distância peça-filme. Visto que todos estes parâmetros são interdependentes, pode-se concluir pela alta complexidade do planejamento necessário para a execução de uma tomada radiográfica bem sucedida [BALASKO M. VERES I, MOLNAR G. (2004) – BURKLE W.S., LEMLE L.P. (1993)]

2.3.3.5 Filmes e Fontes

Como já referido, a radiografia convencional faz uso de filmes como meio de registro radiográfico. Os filmes radiográficos são compostos de uma emulsão e uma base. A emulsão consiste em uma camada muito fina (espessura de 0,025 mm) de gelatina, que mantém dispersos, porém firmemente posicionados, um grande número de minúsculos cristais de brometo de prata. A emulsão é colocada sobre um suporte, denominado base, que é constituída geralmente de um derivado de celulose, transparente e de cor levemente azulada. Os cristais de brometo de prata, presentes na emulsão, possuem a propriedade de, quando atingidos pela radiação eletromagnética (mais comumente a luz visível, ou os raios-X), tornarem-se susceptíveis de reagir posteriormente com um produto químico denominado revelador. O revelador atua sobre esses cristais provocando uma reação de redução do metal, que resulta em prata metálica escura. Os locais do filme atingidos por uma quantidade maior de radiação (ou seja, que experimentaram menor atenuação) apresentarão, após a ação do revelador, um número maior de grãos escuros que as regiões submetidas à radiação de menor intensidade. Dessa forma, quando vistos sob a ação de uma fonte de luz, os filmes apresentarão áreas mais escuras e mais claras que irão definir inequivocamente uma imagem do objeto radiografado ^[35].

Existem hoje vários tipos de filmes no mercado, cada qual com suas características de velocidade e de contraste, atendendo aos mais variados tipos de ensaio. Uma das grandes vantagens da utilização da radiografia convencional em inspeções não-destrutivas consiste, além das imagens de alta definição, no seu custo relativamente baixo de implementação, quando comparado ao das outras formas mais modernas de radiografia (denominadas digitais, o que inclui a modalidade tomográfica).

Os equipamentos utilizados hoje no mercado de radiografia industrial no modo tradicional podem ser classificados em 2 tipos, quais sejam, o de radiação direcionada e o de radiação com feixe panorâmico, que se diferenciam basicamente pela amplitude do campo de ação. Os equipamentos

ou fontes de raios-X mais modernos (aceleradores lineares) podem gerar energias com valores bem acima dos 500 kV, os quais podem ser empregados, por exemplo, na inspeção de peças de aço com até 100 mm de espessura. A Figura 2.25 mostra alguns exemplos de equipamentos de raios-X que são hoje comumente utilizados em campo.

Para peças e componentes mais espessos empregam-se radioisótopos, passando-se a se denominar a técnica de gamagrafia, onde a proteção e os cuidados com a saúde dos operadores se tornam muito mais rigorosas, assim como os raios, ou diâmetros de balizamento que correspondem à região que deve ser completamente isolada da presença de seres vivos durante o ensaio não-destrutivo por radiação ionizante ^[36].

A Figura 2.26 mostra a seqüência empregada no processo de revelação e avaliação do filme fotográfico empregado numa inspeção radiográfica. As necessidades básicas para a montagem de um laboratório para execução desta seqüência de tarefas incluem: produtos químicos, sala climatizada, luzes especiais – vermelhas, água corrente para lavagem dos filmes, pessoal especializado, espaço físico mínimo de 18 m², e inspetor END.

De modo bastante objetivo, a Figura 2.27 expõe um quadro-resumo dos fenômenos, processos e procedimentos envolvidos na inspeção não-destrutiva por técnicas radiográficas convencionais de raios-X.

Figura 2.25 Equipamentos de radiografia por raios-X da Embraer S.A.: (a) Fonte; (b) Console de controle; (c) Sistema em operação. Fotos gentilmente cedidas pela Embraer S.A.

Figura 2.26 Procedimentos e equipamentos envolvidos no processo de revelação de chapas radiográficas e análise dos resultados por inspetor qualificado e credenciado (Adaptado da Ref.32).

2.3.3.6 Tomografia

A tomografia computadorizada cria imagens tridimensionais de objetos a partir de exposições radiográficas, permitindo a realização de cortes não destrutivos em qualquer direção para análise detalhada da amostra. Com o auxílio de software, efetua-se: análise quantitativa de vazios, canais, trincas, partículas da amostra; análise dimensional em relação a um modelo CAD; medidas de precisão em superfícies internas inacessíveis, entre outras possibilidades que a técnica permite.

Figura 2.27 Roteiro cronológico do processo radiográfico tradicional empregando-se raios-X como elemento de caracterização dos materiais (Adaptado da Ref.32).

2.3.4 Termografia Infravermelha

2.3.4.1 Considerações Iniciais

Radiação infravermelha é parte do espectro eletromagnético (Figura 2.28) e se comporta de modo similar à luz visível, atravessando o espaço na velocidade da luz (~ 300.000 km/s), podendo ser refletida, absorvida, emitida e transmitida através de um corpo sólido, assim como dissipada em seu interior (Figura 2.29).

Figura 2.28 Espectro de radiação eletromagnética, em que se destacam as faixas correspondentes à luz visível (elipse azul) e ao infravermelho (elipse vermelha) (Adaptado da Ref.37).

Figura 2.29 Balanço de energia em um meio sólido semitransparente irradiado em uma de suas faces (Adaptado da Ref.37).

Rigorosamente falando, todos os objetos emitem radiação infravermelha como uma função da sua temperatura absoluta. Energia infravermelha é basicamente gerada pela vibração e rotação dos átomos e das moléculas. Desta forma, quanto mais aquecido está um objeto, maior é a agitação atômica e/ou molecular interna, e, portanto, maior é a energia infravermelha por ele emitida.

Esta energia emitida pelos corpos quente é detectada por câmeras infravermelhas, as quais, de fato, não medem a temperatura em si do espécime, mas sim detectam a intensidade da radiação térmica que ele libera para o meio externo.

A energia emitida por uma superfície a uma determinada temperatura é denominada brilho espectral, e é definida pela Lei de Planck:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1)$$

onde:

I = radiância espectral [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$] (sr = esterradiano = unidade SI de ângulo sólido)

ν = frequência [Hz]

T = temperatura do corpo negro [K]

h = constante de Planck [J/Hz]

c = velocidade da luz [m/s]

e = número de Euler (adimensional)

k = constante de Boltzmann [J/K]

A Lei de Planck para a radiação de um corpo negro² exprime a radiância espectral em função do comprimento de onda e da temperatura do mesmo.

Figura 2.30 Espectro de radiação de um corpo negro (Adaptado da Ref.38).

Basicamente, como nenhuma luz é refletida, transmitida ou dissipada, o corpo parece negro quando está frio. Porém, na medida em que ele é aquecido, ele passa a emitir um espectro de luz que depende essencialmente da sua temperatura.

² Corpo que, por definição, possui uma emissividade de 100% da radiação incidente. Isto significa que ele tem a capacidade de absorver 100% da radiação que lhe é direcionada, visto só ser possível um corpo emitir radiação se esta é anteriormente absorvida pelo mesmo. Uma emissividade de 100% implica necessariamente em refletividade, dissipação e transmitância nulas de energia. Emissividade e refletividade são propriedades de superfície, ao contrário da absorção, dissipação e transmitância, que são efeitos mássicos. Um espelho perfeito é a antítese de um corpo negro perfeito, pois o primeiro reflete toda energia incidente.

Há, portanto, uma relação direta entre a temperatura do corpo negro e o comprimento de onda que ele emite, ou, em outras palavras, a coloração que ele exibirá. Em temperaturas extremamente elevadas, ele emitirá luz branca (quente), e, em temperaturas intermediárias, ele exibirá um amplo espectro de cores, cada uma univocamente associada a um comprimento de onda e a uma temperatura bem estabelecida (Figura 2.30 e Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Relação entre temperatura e coloração de um corpo negro (Adaptado da Ref.39).

Temperatura [°C]	Cor	Freqüência [Hz]	Comprimento de onda [m]
~1.100	Vermelho	$3,89 \times 10^{14}$	$\sim 768 \times 10^{-9}$
~2.200	Laranja	$4,57 \times 10^{14}$	$\sim 656 \times 10^{-9}$
~3.400	Amarelo	$5,09 \times 10^{14}$	589×10^{-9}
Acima de 10.000	Branco	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$

Uma câmera de infravermelho é, portanto, um radiômetro espectral que mede esta energia emitida pelo corpo, sendo que a sua calibração (baseada na Lei de Planck) permite classificar a distribuição de temperatura na superfície inspecionada de interesse. Este gradiente de temperaturas será exibido ao operador através de uma escala de cores falsas (denominadas cores quentes – ex: vermelho, e cores frias – ex: azul), ou de tons de cinza^[39].

2.3.4.2 Formas de Medição

A termografia infravermelha (TIV) é uma técnica de ensaios não-destrutivos que se baseia no mapeamento térmico (originando desta forma os chamados termogramas) de uma peça, componente ou estrutura para a localização de suas regiões danificadas ou defeituosas.

Isto é possível porque a condutividade térmica, ou, inversamente, a resistividade térmica dos materiais e sua densidade dependem fortemente do seu grau de integridade. Quando o material (ex. laminado compósito polimérico) apresenta vazios, poros e delaminações em sua estrutura, sua condutividade térmica e densidade diminuem localmente e, correspondentemente, sua difusividade térmica é alterada. Isto afeta sobremaneira as suas características de transferência de calor no interior do material, alterando as taxas locais de fluxo de calor e causando os chamados gradientes térmicos, ou seja, as diferenças localizadas na temperatura da peça inspecionada.

Portanto, o aquecimento ou o resfriamento forçado da peça (denotando o que se chama termografia ativa), ou então o aquecimento ou resfriamento ocorrendo naturalmente no componente (termografia passiva), não de revelar a presença dos danos e/ou defeitos quando de sua inspeção e imageamento por intermédio de uma câmera termográfica ou termovisor.

Basicamente, um termograma é o registro permanente, na forma analógica ou digital, das diferentes temperaturas locais no componente, na forma de gradientes de coloração (escala policromática) ou de tonalidades de cinza (escala monocromática).

Na última década, a TIV tem encontrado crescente receptividade por parte da indústria de construção aeronáutica, por exhibir um promissor potencial para a redução dos custos de inspeção durante os estágios de manufatura e de manutenção periódica de componentes estruturais. Além disso, ela favorece a obtenção de resultados confiáveis, quanto ao tamanho e à localização de defeitos e danos em laminados compósitos, de uma maneira rápida e eficiente [MALDAGUE X. (2001), RAY B.C. HANSAN S.T. (2007), AVDELIDIS N.P. (2004)]

Na chamada termografia ativa [SWIDERSKI.(2002)-RIEGERT(2007)], o objeto de estudo é energeticamente estimulado (por exemplo, através de fontes térmicas simples como lâmpadas, *flashes* - Figura 2.31, jatos de ar quente, ou então, por meios mais elaborados, tais como pulsos ultra-sônicos, correntes parasitas, radiação infravermelha, microondas, *laser*, dentre outros), de forma que um fluxo interno de calor seja gerado na parte inspecionada. A eventual

presença de defeitos e/ou danos superficiais ou sub-superficiais causa uma perturbação deste fluxo, levando a um contraste térmico na superfície do componente, que é detectado por um termovisor ou uma câmera termográfica, acusando, desta forma, a existência da descontinuidade. Durante a inspeção na forma ativa, a fonte de calor pode estar no mesmo lado ocupado pela câmera termográfica, relativamente ao objeto estudado, configurando-se assim o modo de reflexão ou, então, a fonte térmica pode estar do lado oposto ao da câmera, ficando o objeto de interesse entre a fonte e a câmera, estabelecendo-se desta feita o modo de transmissão ^[SANTULLI.C.(2004)]. Ambos os modos de reflexão e transmissão são esquematizados na Figura 2.32.

Figura 2.31 Alguns modos de aquecimento em inspeção termográfica ativa (Adaptado Ref.47).

Figura 2.32 Termografia infravermelha na forma ativa em modos de inspeção por Reflexão e Transmissão, respectivamente (Adaptado da Ref.37).

A Figura 2.33a ilustra o processo de inspeção termográfica por reflexão de dois painéis, um sem defeito, e outro contendo um dano/defeito (delaminação, corpo estranho, etc). A Figura 2.33b plota o perfil de temperaturas na superfície da peça acima do defeito ou dano interno.

Figura 2.33 (a) Termografia infravermelha em modo de Reflexão; (b) Curvas temperatura x tempo na superfície inspecionada para o material íntegro e contendo uma descontinuidade geométrica, respectivamente (Adaptado da Ref.48).

Como o defeito/dano reduz a capacidade de o material transportar calor (energia) a partir da face irradiada para a face oposta do laminado, o calor se acumula na região que está sob inspeção da câmera termográfica, de sorte que ela identificará um ponto quente (*hot spot*).

O ciclo de aquecimento na técnica termográfica infravermelha denominada *Flash* ou Pulsada é bastante curto, da ordem de milissegundos, sendo realizado através de lâmpadas, *laser* ou *flashes* de alta potência (tipicamente 2000 W). Basicamente, esta técnica consiste em aquecer brevemente a amostra e registrar-se a curva de decaimento da temperatura (Figura 2.33) A temperatura do material varia rapidamente após a injeção do pulso inicial porque a frente térmica propaga, por difusão, sob a superfície em direção à face oposta do componente, bem como devido a perdas por radiação e por convecção [BATES D.SMITH (2000) - SHEPARD S.M. (2003)].

Conforme já mencionado, a presença de defeitos/danos superficiais e sub-superficiais reduz a taxa de difusão do calor de tal forma que quando a temperatura da superfície inspecionada é registrada, um gradiente de temperaturas surgirá com relação à área íntegra que envolve a defeituosa/danificada no momento em que a frente térmica alcança a descontinuidade (no caso, geométrica). O tempo decorrido entre a emissão/injeção do pulso térmico e a observação deste efeito (gradiente térmico) na superfície inspecionada da peça permite inclusive determinar, ou ao menos estimar com boa precisão a profundidade do dano-defeito na peça.

A técnica de termografia pulsada é afetada por variações locais da emissividade do material e por aquecimento superficial não-uniforme do espécime, os quais podem mascarar a visibilidade do dano/defeito. De fato, os gradientes térmicos induzidos por aquecimentos não-uniformes podem ser confundidos com defeitos/danos no material, levando a indicações falsas quanto à presença de descontinuidades [MARSH (2007) NDT – SHEPARD S.M (2003)].

A Figura 2.34 mostra um equipamento completo de TIV pulsada, incluindo a indumentária necessária para a proteção do operador, e o resultado da inspeção de um componente aeronáutico estrutural primário exibindo uma grande delaminação.

(a)

(b)

Figura 2.34 (a) Sistema completo TIV e operador; (b) Inspeção de um componente estrutural híbrido metal/compósito aeronáutico revelando-se a presença de uma grande delaminação na sua interface (Adaptado da Ref.53).

2.3.4.3 Vantagens da Termografia Infravermelha

As principais vantagens da metodologia termográfica são ^[3,12,54]:

- Δ Rapidez da inspeção;
- Δ Interpretação simples das imagens;
- Δ Análise em tempo real;
- Δ Radiação não letal.

- Δ Não requer contato com o objeto inspecionado;
- Δ Inspeção global da peça;
- Δ Acesso a apenas um lado da peça;
- Δ Não sensível à geometria da peça;
- Δ Adequado para grandes superfícies.

2.3.4.4 Desvantagens da Termografia Infravermelha

Por outro lado, as desvantagens dessa técnica são as seguintes ^[3,12,54]:

- Requer uniformidade de aquecimento/resfriamento;
- Custo dos equipamentos é elevado;
- Laminados possuem espessura limitada (até 10 mm em geral);
- Detecção de defeitos poucos profundos (a profundidade de detecção é diretamente proporcional ao tamanho da descontinuidade);
- Variações de emissividade em uma mesma peça;
- Sensibilidade ao modo de aquecimento/resfriamento (tipo, duração, posição).

2.3.5 Shearografia

2.3.5.1 Considerações Iniciais

O ensaio de *shearografia* está sendo atualmente considerado como uma nova forma de END, tendo como sua principal vantagem o fato de ser uma técnica de inspeção relativamente rápida e confiável quando aplicada em componentes estruturais. Após vários anos em fase de desenvolvimento e

avaliação, recentemente a *shearografia* vem sendo aplicada em alguns casos no estágio de produção industrial, notadamente nas indústrias aeronáutica e aeroespacial [KRUPKA R.(2001) – BURGGRAF, KRUPKA R. (1999)] .

2.3.5.2 Princípios de *Shearografia*

A *shearografia* é uma técnica de mensuração por intermédio de luz *laser* baseada no processamento de dados digitais obtidos a partir de técnicas de deslocamento de fase e de interferometria. Devido à utilização de um dispositivo especial de cisalhamento (*shearing*) a *shearografia* possibilita a mensuração de gradientes de deslocamento, gerando, a partir destes, informações detalhadas sobre a deformação experimentada pelo objeto sob inspeção quando o mesmo é submetido a uma determinada excitação externa. Como os danos e os defeitos em corpos sólidos usualmente induzem concentração de tensões e deformações, torna-se mais fácil revelar defeitos/danos exibindo anormalidades em nível de deformação do que anormalidades em termos de deslocamento [CHOI S.W.-LEE J.H.(2004)] .

O mecanismo básico operacional da *shearografia* digital é mostrado na Figura 2.35. O objeto sob a avaliação deste tipo de técnica não-destrutiva é iluminado com luz *laser* irradiada a partir de uma fonte pontual, sendo simultaneamente imageado por uma câmera que possibilita a captura e a imediata comparação de imagens subseqüentes apresentando pequenas diferenças de deslocamentos e, conseqüentemente, de deformações cisalhantes causadas pela ação de um modo de excitação térmica e/ou mecânica aplicada. A câmera é conectada a um microcomputador para a gravação e posterior processamento dos dados obtidos, sendo composta por um sensor de imagens CCD, uma lente e um dispositivo de cisalhamento da imagem. Este último conjunto construtivo é constituído basicamente 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) do espécime inspecionado, derivando daí o nome da técnica em questão [ERNE O. (2000)] .

Figura 2.35 Esquemático operacional básico da *shearografia* digital (Adaptado da Ref.59).

Em resumo, a *shearografia* é uma técnica que utiliza *laser* para medir, com grande precisão, pequenas deformações ocorridas nas superfícies de peças e componentes decorrente da aplicação de um determinado carregamento (Fig. 2.36).

A Figura 2.37 mostra os diversos tipos de carregamento (i.e., de excitação externa) que podem ser aplicados ao objeto investigado de modo a causar, na superfície do mesmo, os efeitos passíveis de serem mensurados e transformados em imagens. Estas últimas são compostas basicamente por franjas não-homogêneas de interferência, as quais apresentam características típicas, tais como densidade e disposição espacial (Fig. 2.38), que podem revelar, direta ou indiretamente, a presença de algum dano/defeito localizado externamente (superficial) ou internamente (sub-superficial) no componente avaliado [GERALDES S.M.M.(2008)].

Tipicamente, a *shearografia* oferece novas possibilidades para os END na detecção, identificação e quantificação de defeitos/danos discretos e profundos em diferentes classes de materiais, especialmente os laminados compósitos poliméricos sólidos, o que inclui as delaminações, os descolamentos e as microtrincas [GREGORY R. (2003) – TOH S.L.SHIM (1990)].

Figura 2.36 Sistema completo de *shearografia* digital (Adaptado das Refs.59,61).

Figura 2.37 Diferentes modos de excitação externa em *shearografia*: (a) Vibracional (inclui ultrassom); (b) Pressão (positiva ou negativa); (c) Mecânica; e (d) Térmica (Adaptado Ref.59).

Figura 2.38 Imagens *shearográficas* mostrando franjas não-homogêneas de interferência, com densidade e disposição espacial bem estabelecidas, as quais denunciam a existência de concentração de deformações no interior ou na superfície das peças, e que podem estar associadas à presença local de defeitos/danos. Imagens gentilmente cedidas pela Photonita Metrologia Óptica®.

2.3.5.3 Equipamentos de *Shearografia*

A *shearografia* é uma técnica de inspeção que pode também ser aplicada em campo, porém requerendo adaptações com relação ao uso laboratorial, dada a grande sensibilidade do equipamento a vibrações mecânicas (por exemplo, oriundas da movimentação local do pavimento) e transientes térmicos (por exemplo, rajadas de vento) inesperados. Caso estes possam ser controlados ou evitados, a técnica é potencialmente capaz de

realizar a rápida detecção de danos/defeitos, permitindo a confecção imediata de laudos técnicos após a finalização dos ensaios. Em várias ocasiões a inspeção não-destrutiva tem necessariamente que ser realizada em campo, como, por exemplo, na manutenção, no reparo e na montagem de aeronaves e suas partes, quando um equipamento ou sistema portátil de END é imprescindível e pode ser de grande valia. Sistemas *shearográficos* portáteis já estão em franco desenvolvimento e são aplicados especialmente nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, tal como são mostrado na Figura 2.39. Eles são basicamente constituídos por uma pequena câmara de vácuo que suga diretamente a área da superfície a ser inspecionada.

Figura 2.39 Exemplos de equipamentos portáteis de *shearografia* que podem ser aplicados em campo (Adaptado da Ref.63).

Uma vez esta área é excitada mecanicamente pelo vácuo aplicado, uma câmera CCD interna à câmara de vácuo, acompanhada de todo sistema óptico de lentes, polarizador e iluminação por *laser* (ilustrados nas Figs. 2.35 e 2.36) grava todos os deslocamentos (os quais são posteriormente convertidos em deformação) que ocorrem na superfície da peça. Como já adiantado, as imagens são capturadas na forma de franjas de interferência, e permitem, após o seu processamento digital, acusar a presença e a localização dos eventuais danos/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 restrita e o tempo disponível para inspeção é relativamente escasso.

O tempo total da inspeção, por imagem coletada, pode ser inferior a 30 segundos, e a área amostrada por imagem é de aproximadamente 220 x 180 mm².

Sistemas mais robustos (fixos) tem sido desenvolvidos para a inspeção de peças-complexas, elementos estruturais, sub-estruturas e mesmo estruturas completas de aeronaves, helicópteros (Fig. 2.40) e até mesmo de ônibus espaciais.

Figura 2.40 (Continua na próxima página)

Figura 2.40 (a) Sistema com câmera flexível utilizado no ensaio de *shearografia* a vácuo para peças complexas; (b) Ensaio *shearográfico* à vácuo de painéis estruturais aeronáuticos; (c) Ensaio *shearográfico* à vácuo de rotores compostos de helicópteros. campo (Adaptado da Ref.63).

2.3.5.4 Vantagens da Técnica *Shearográfica*

As principais vantagens da metodologia *shearográfica* são ^[63]:

- ✦ Inspeção global (não pontual);
- ✦ Sem contato do sensor;
- ✦ Grande sensibilidade;
- ✦ Rapidez;
- ✦ Capacidade de operação fora do ambiente laboratorial;
- ✦ Acesso a apenas um lado da peça;
- ✦ Insensível à geometria da peça;
- ✦ Adequado para grandes superfícies;
- ✦ 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.

A principal desvantagem da *shearografia* é que os efeitos da presença de defeitos internos à peça, componente ou estrutura devem necessariamente se manifestar como campos de deslocamento, ou deformação, na superfície que está sendo inspecionada. Em suma, assim como a termografia infravermelha, a *shearografia* não é uma metodologia de volume (como a são a ultrasonografia e a radiografia), mas sim de superfície.

3. MATERIAL E CORPOS-DE-PROVA

3.1 Laminados Compósitos Poliméricos

3.1.1 Considerações Iniciais

Neste trabalho foram avaliadas peças aeronáuticas confeccionadas em laminados estruturais sólidos de matriz termorrígida epóxi reforçada com fibras de carbono de alta resistência mecânica.

Essas peças foram supridas pela Embraer S/A, que as utiliza na fabricação de componentes estruturais primários e secundários de aeronaves de médio porte.

As peças foram obtidas por consolidação em autoclave, a qual foi internamente pressurizada, empregando-se a técnica de bolsa de vácuo, com a cura realizada a uma temperatura próxima dos 180°C.

3.1.2 Laminado Carbono-Epóxi

A estrutura básica do laminado Carbono-Epóxi (C-EPX) que constitui as peças inspecionadas não-destrutivamente na presente Dissertação de Mestrado é formada por resina termorrígida epóxi, tenacificada com partículas de elastômero termoplástico e fortalecida com fibras contínuas de carbono AGP193, gramatura 193 g/m². Estas últimas apresentavam-se na forma de tecido bidirecional com trama simples (*plain-weave*), contendo 11,5 feixes/polegada x 11,5 feixes/polegada nas direções principais (0 e 90°, respectivamente), com 3000 filamentos por feixe. O material, na sua forma original pré-impregnada foi fornecido pela Hexcel® (<http://www.hexcel.com/>).

O teor ou a fração volumétrica ideal (alvo) das fibras no compósito polimérico final, já processado, é da ordem de 60%.

Os laminados termorrígidos que deram origem às peças inspecionadas foram confeccionados por intermédio da justaposição em molde plano, côncavo ou convexo das lâminas individuais de tecido bidirecional 0/90° pré-impregnado com o oligômero epoxídico. Repetiu-se, desta forma, por quantas vezes foram necessárias, e de acordo com as orientações de interesse da fase de reforço fibroso, o empilhamento das lâminas tecidas visando atingir-se a espessura final desejada do componente, bem como o grau de isotropia (ou anisotropia) requerido para suas propriedades finais. Quando requeridas, foram empregadas operações de co-cura (co-consolidação) e/ou colagem do componente.

A Figura 3.1 mostra a microestrutura de um laminado desta natureza, sob três distintas ampliações de imagem.

Figura 3.1 Microestrutura da seção longitudinal de um laminado termorrígido C-EPX com distribuição quase-isotrópica de fibras no plano. A direção da espessura do laminado corresponde à altura da figura. (Adaptado da Ref.64).

As propriedades mecânicas básicas de um laminado C-EPX, usado neste caso, como estudo para os materiais ensaiados e cuja estrutura é similar àquela empregada na confecção das peças ora avaliadas por inspeção não-destrutiva, porém consolidado na forma de placa-plana com espessura de 5 mm e dimensões no plano de $(150 \times 100) \text{ mm}^2$ (Figura 3.2), foram determinadas sob carregamento em flexão a três pontos, sendo os resultados obtidos listados na Tabela 3.1. Na mesma tabela são apresentados também os valores de dureza e de densidade mássica do laminado termorrígido.

Figura 3.2 Placa de laminado termorrígido C-EPX com arranjo $[(0/90), (+45/-45)_2, (0/90)]_6$ ensaiada em flexão sob três pontos. Sua microestrutura foi mostrada na Fig. 3.1. (Adaptado da Ref.64).

Tabela 3.1 Propriedades mecânicas básicas em flexão lenta sob três pontos do laminado C-EPX (Fig. 3.2) à temperatura ambiente. Média aritmética de três espécimes ensaiados. A dureza e a densidade do laminado são também reportadas (Adaptado da Ref.64).

Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima (MPa)	Deformação na Tensão Máxima (%)	Tenacidade na Tensão Máxima (MJ/m^3)	Dureza Vickers*	Densidade Aparente (g/cm^3)
42,3	727	1,9	7,6	120	1,6

* Valor convertido a partir de dureza Rockwell superficial, na escala 15 T (esfera com diâmetro de 1,6 mm e carga de 150 N), por intermédio da norma SAE J-417.

3.2 Peças Submetidas às Inspeções Não-Destrutivas

A Figura 3.3 mostra as três (03) peças laminadas compósitas principais (numeradas de 1 a 3), de um conjunto de seis (06) manufaturadas e fornecidas pela Embraer S.A., que foram avaliadas pelas técnicas não-destrutivas empregadas no presente estudo.

Figura 3.3 Três (03) peças laminadas compósitas principais submetidas à todas as inspeções não-destrutivas avaliadas nesta Dissertação de Mestrado.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das características técnicas de todas as peças que foram submetidas aos ensaios não destrutivos empregados.

Tabela 3.2 Relação das peças de corpos de provas submetidos aos ensaios de END.

PEÇA	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICA	APLICAÇÃO
01	Placa Plana	Laminado Pre-Preg Bidirecional de Fibra de Carbono com Resina Époxi	Corpo de Prova
02	Perfil em U	Laminado Pre-Preg Bidirecional de Fibra de Carbono Co-Curados com Resina Époxi	Montagem do Suporte de Fixação do Trem de Pouso Auxiliar ERJ 190
03	Bordo de Ataque I	Laminado Pre-Preg Bidirecional de Fibra de Carbono com Resina Epóxi e Reforço de Manta de Metalização Cobre	Bordo de Ataque do Profundor Estabilizador Phenom 100
04	Tanque Combustível	Laminado Pre-Preg Bidirecional de Fibra de Carbono com Resina Époxi	Montagem Tanque Combustível Sikorsky S61
05	Nervura do Revestimento do Profundor	Laminados Pre-Preg Bidirecional de Fibra de Carbono Co-Curados com Resina Époxi	Revestimento Profundor Phenom 100
06	Bordo de Ataque II	Laminados Pre-Preg Bidirecional de Fibra de Carbono Co-Curados com Resina Epóxi e Reforço de Fibra Kevral Dupont	Bordo de Ataque Profundor Estabilizador Phenom 100

As Figuras 3.4-3.6 tratam e descrevem individualmente cada uma destas três (03) peças estruturais.

PEÇA 1

- NOME: PLACA-PLANA;
- APLICAÇÃO EM SERVIÇO: NENHUMA (ESPÉCIME LAMINADO PARA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO DE END CONTENDO 03 REGIÕES DELAMINADAS CIRCULARES COM DIFERENTES DIÂMETROS E PROFUNDIDADES NA ESPESSURA DA PLACA, INTENCIONALMENTE E CONTROLADAMENTE CRIADAS PELA INTRODUÇÃO DE FITA DE POLITETRAFLUORETILENO);
- ESFORÇOS MECÂNICOS EM SERVIÇO: NENHUM;
- AMBIENTE DE SERVIÇO: TEMPERATURA AMBIENTE.

Figura 3.4 Placa-plana compósita laminada (peça 1) em que as setas vermelhas apontam regiões em que foram criadas propositalmente falhas de adesão entre as camadas vizinhas adjacentes do laminado, em diferentes profundidades ao longo de sua espessura de aproximadamente 1,0 mm, tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.

PEÇA 2

- NOME: PERFIL EM U;
- APLICAÇÃO EM SERVIÇO: MONTAGEM DO SUPORTE DE FIXAÇÃO DO TREM DE POUSO AUXILIAR DA AERONAVE ERJ 190;
- ESFORÇOS MECÂNICOS EM SERVIÇO: TRAÇÃO LONGITUDINAL E FLEXÃO;
- AMBIENTE DE SERVIÇO: TEMPERATURAS ENTRE -20 E 60 GRAUS CELSIUS.

Figura 3.5 Perfil-U laminado compósito (peça 2) em que as linhas amarelas correspondem a curvaturas em que é grande o potencial para o desenvolvimento de defeitos de manufatura, separação entre lâminas, tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.

PEÇA 3

- NOME: BORDO DE ATAQUE I;
- APLICAÇÃO EM SERVIÇO: BORDO DE ATAQUE I DO PROFUNDOR DO ESTABILIZADOR HORIZONTAL DA AERONAVE PHENOM 100;
- ESFORÇOS MECÂNICOS EM SERVIÇO: FLEXÃO, TORÇÃO E IMPACTO FRONTAL;
- AMBIENTE DE SERVIÇO: TEMPERATURAS ENTRE -20 E 60 GRAUS CELSIUS.

Figura 3.6 Bordo de ataque I laminado compósito (peça 3) em que as setas magenta e as linhas amarelas indicam regiões de grande potencial para o desenvolvimento de defeitos de manufatura, do tipo separação entre lâminas (delaminação), tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.

A Figura 3.7 mostra uma peça que corresponde a uma pequena parte do tanque de combustível do helicóptero Sykorsky S61, em que a região de reforço (visando aumento da rigidez) é obtida por intermédio da ondulação proposital das laminas pré-imregnadas individuais. Ela foi inspecionada somente pela técnica de termografia infravermelha.

PEÇA 04

- NOME: TANQUE DE COMBUSTÍVEL;
- APLICAÇÃO EM SERVIÇO: MONTAGEM DO TANQUE DE COMBUSTÍVEL DO HELICÓPTERO SIKORSKY S61;
- ESFORÇOS MECÂNICOS EM SERVIÇO: CARREGAMENTO DE TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO;
- AMBIENTE DE SERVIÇO: TEMPERATURAS ENTRE -20 E 60 GRAUS CELSIUS, E EVENTUAL CONTATO COM HIDROCARBONETOS.

A Figura 3.8 mostra duas (02) peças laminadas compósitas adicionais, numeradas respectivamente 5 e 6, que são descritas na seqüência. A peça 5 foi inspecionada por Ultrassom na modalidade transmissão *squirter*, bem como via radiografia digital, ou computadorizada de raios-X na modalidade tomográfica (2D e 3D). Já a peça 6 foi avaliada unicamente por radiografia convencional (por filmes) de raios-X.

PEÇA 05

- NOME: NERVURA DO REVESTIMENTO DO PROFUNDOR;
- APLICAÇÃO EM SERVIÇO: REVESTIMENTO DO PROFUNDOR PHENOM 100;
- ESFORÇOS MECÂNICOS EM SERVIÇO: TRAÇÃO AO LONGO DO COMPRIMENTO DO AVIÃO;
- AMBIENTE DE SERVIÇO: TEMPERATURAS ENTRE -20 E 60 GRAUS CELSIUS.

Figura 3.7 Parte de tanque de combustível laminado compósito (peça 4) em que a linha amarela e a seta magenta indicam regiões de grande potencial para o desenvolvimento de defeitos de manufatura, tipo vazios alinhados, tal como claramente determinados por US pulso-eco pela Embraer e claramente visíveis a olho nu durante observação da seção transversal: (a) Visão de topo; (b) Seção transversal.

PEÇA 06

- NOME: BORDO DE ATAQUE II;
- APLICAÇÃO EM SERVIÇO: BORDO DE ATAQUE II DO PROFUNDOR DO ESTABILIZADOR HORIZONTAL DA AERONAVE PHENOM 100;
- ESFORÇOS MECÂNICOS EM SERVIÇO: FLEXÃO, TORÇÃO E IMPACTO FRONTAL;
- AMBIENTE DE SERVIÇO: TEMPERATURAS ENTRE -20 E 60 GRAUS CELSIUS

Figura 3.8 Três peças laminadas compósitas, em que as linhas amarelas correspondem a regiões de grande potencial de desenvolvimento de defeitos de manufatura, tal como claramente determinadas por US pulso-eco pela Embraer.

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização das inspeções (ou, de modo genérico, ensaios) não-destrutivas, bem como para a calibração prévia dos respectivos equipamentos empregados neste estudo, foi estipulado que todos os sinais obtidos pelas técnicas aplicadas teriam como linha de base (ou referência) os resultados obtidos por intermédio do ensaio ultrassônico na modalidade pulso-eco. Conforme já adiantado, este foi justamente o ensaio realizado na linha de produção da Embraer S.A. e que delimitou claramente as três (03) áreas danificadas propositadamente na peça chamada Placa-Plana (nominada Peça 1 no Capítulo 3), além de reprovar as peças respectivamente denominadas Perfil-U (Peça 2) e Bordo de Ataque I (Peça 3).

4.1 Inspeções Ultrassônicas

4.1.1 Considerações Iniciais

Para a realização das inspeções ultrassônicas (US) foi desenvolvida uma metodologia de calibração com base nos padrões estabelecidos pelas Normas ASTM E-317 e T.O. 33B-1-1 / *Navair* 01-1A-16 TM 1-1500-335-23. Cabe ressaltar que, para cada uma das três modalidades da inspeção por ultrassom empregada neste estudo, foi realizada uma calibração específica associada ao transdutor e equipamentos utilizados naquela modalidade, qual sejam, Pulso-Eco convencional, Transmissão por *Squirter* e Pulso-Eco *Phased-Array*.

Cabe ressaltar que, no estudo em questão, o método pulso-eco convencional utilizado gerou resultados apenas na configuração de imagem denominada *A-Scan*, sendo os resultados registrados apenas na forma de fotos e filmes enquadrando o visor TRC do equipamento empregado. No procedimento contou-se com o auxílio de um inspetor (Mario Bueno, que possui Qualificação e Certificação CTA Nível 2 conforme Norma NAS 0410)

com grande experiência e conhecimento técnico nas tarefas de calibração e inspeção não-destrutiva propriamente dita.

4.1.2 Calibração e Inspeção

4.1.2.1 US Pulso-Eco de Contato Convencional

Em função das espessuras dos detalhes construtivos das peças inspecionadas e da natureza do material compósito em questão, foi utilizado na calibração um transdutor convencional mono-elemento de frequência mediana de 5,0 MHz. A escolha se deu com base em experiências prévias, quando se observou que, para menores frequências, obtinham-se melhores respostas para polímeros reforçados com fibras de carbono, visto que o comportamento do feixe sônico era mais concentrado e, portanto, menos distorcido pelas imperfeições presentes no material.

Todos os procedimentos foram conduzidos na unidade da Embraer S.A. em Eugênio de Melo, São Jose dos Campos-SP.

Os equipamentos empregados e alguns dos valores associados à sua calibração são abaixo listados:

- Equipamento Panametrics Epoch XT®;
- Transdutor Krautkramer® com frequência de 5 MHz e diâmetro de 6,35 mm, com *delay* de 5 mm de espessura;
- Sensibilidade (ganho) de 52 dBs;
- Escala de 10 mm;
- Agente acoplante na forma de gel.
- Sinalizadores de alarme e de ruído desligados;
- Padrão original de referência empregado foi a Placa-Plana (Peça 1).

O uso de um transdutor de relativamente pequeno porte objetivou facilitar o contato para a inspeção das curvaturas das superfícies das peças denominadas Perfil em U (Peça 2) e Bordo de Ataque I (Peça 3).

Por sua vez, o uso do espaçador criando o chamado “*delay line*” visou inibir a emissão de ruídos que pudessem afetar os sinais emitidos e capturados pelo transdutor ultrassônico.

De modo a realizar as inspeções foi necessário primeiramente obter-se uma calibração visualizada na tela do equipamento. Estabeleceu-se que o sinal de retorno (eco) relativo à espessura total da peça (da ordem de 3,3 mm para o Pefil-U - Peça 2, conforme mensurada com paquímetro), tal como observado na escala horizontal do tempo (ou distância), corresponderia a cerca de 60% de amplitude da tela, conforme pode ser verificado na Figura 4.1. Nota-se nesta figura que este eco de retorno (reflexão) do sinal ultrassônico (correspondente, conforme acima já mencionado, à superfície oposta à de inspeção), que é caracterizado por um alto pico de energia, está localizado aproximadamente no centro da tela do equipamento. Observa-se ainda que sua posição corresponde a uma distância, contada a partir da superfície inspecionada (esta caracterizada por um pico na posição de origem do sistema, qual seja, 0 mm), de 3,34 mm (conforme indicado digitalmente no canto superior direito da tela), que é a espessura exata da peça.

Isto garante a calibração do equipamento para determinada peça, e permite não só a detecção de defeitos/danos no interior do laminado durante a sua inspeção, como a localização dos mesmos a partir da origem de coordenadas, ou seja, possibilita a determinação da profundidade destes.

A presença das discontinuidades no material é revelada pela existência de picos de reflexão no intervalo de tempo (ou distância, mensurada no eixo das abscissas) entre, respectivamente, os picos de injeção do sinal ultrassônico (posição 0 mm, ou seja, a origem do sistema de coordenadas) e de reflexão na face oposta do laminado (posição correspondente a 3,34 mm) conforme será mostrado no Capítulo 5. Neste caso, a profundidade do dano/defeito será então claramente exibida na lateral superior direita da tela.

A Figura 4.2 mostra os procedimentos de varredura manual de algumas das peças compósitas executados pelo operador do transdutor ultrassônico. Os mesmos procedimentos foram empregados tanto durante a calibração do sistema para as diversas peças, como ao longo das respectivas inspeções.

Figura 4.1 Procedimento de calibração do equipamento ultrasônico pulso/eco Panametrics Epoch XT®, quando a espessura da Placa-Plana (1) é indicada digitalmente na tela.

(a)

(b)

(c)

Figura 4.2 (a) Visão global do equipamento ultrasônico Panametrics Epoch XT® operando em modo pulso-eco; (b) Posicionamento do transdutor para realizar a inspeção do Perfil-U (2); (c) Na Placa-Plana (1), com auxílio de glicerina como agente acoplante para garantir o contato pleno do transdutor mono-cristal com a superfície da peça inspecionada.

4.1.2.2 US por Transmissão-*Squirter*

A técnica US por transmissão, ou transparência, na modalidade denominada *squirter* emprega colunas d'água como agentes auxiliares de transmissão e recepção dos sinais ultrasônicos. Por este motivo, foi necessário utilizarem-se valores mais baixos de frequência de pulsos sônicos.

A modalidade US-*squirter* possui a grande vantagem de possibilitar a completa automação da linha de inspeção para peças planas ou possuindo pequenas curvaturas. Por outro lado, grandes dificuldades são encontradas no ensaio de peças exibindo geometria mais complexa, em razão de as colunas d'água, que exercem também o papel de agente acoplante, não se manterem permanentemente num posicionamento exatamente perpendicular à superfície da peça avaliada, reduzindo assim o tão necessário alinhamento entre as mesmas para a perfeita transmissão e captura das ondas ultrasônicas.

Todos os procedimentos foram conduzidos na unidade da Embraer S.A. em Eugênio de Melo, na cidade de São Jose dos Campos-SP.

O equipamento foi calibrado segundo dois modos distintos de sensibilidade de inspeção, relativamente ao padrão de calibração de laminados compósitos sólidos planos utilizado pela empresa. Primeiramente empregou-se 40 dBs de sensibilidade sob uma frequência de onda de 1 MHz, seguido, numa segunda ocasião, por um sinal de resposta com sensibilidade de 53 dBs sob frequência de 1 MHz, o que proporcionou uma calibração mais adequada de acordo com uma escala de cores indicativas das regiões que produzem maior ou menor atenuação do feixe ultrasônico, correspondentes, respectivamente, a locais contendo danos/defeito e íntegros da peça inspecionada.

Os equipamentos empregados e alguns dos valores associados à sua calibração são listados abaixo:

- Equipamento SEA[®] - Systems, Engineering & Automation;
- Transdutor Harisonic[®] IF-0512 – P5MHz Ø 0,750” Yo+11,1” S/N 02L130;

- Sensibilidade (ganho) de 80% de amplitude do sinal de padrão;
- Pressão da coluna d'água de 0,5 bar;
- Escala de 10 mm;
- Sinalizadores de alarme e de ruído desligados;
- Padrão de referência empregado foi um tecido pré-impregnado Carbono-Epóxi Tipo 1, Classe 1,8 h com 1% de porosidade e inclusões internas (CEMB E2192954).

Os procedimentos de calibração e ensaio são respectivamente ilustrados na Figura 4.3.

Figura 4.3 Posicionamentos para calibração (a), e inspeção (b) da peça Placa-Plana (setas vermelhas) no sistema US *Squirter* da Embraer S.A. As áreas de interesse nas figuras são indicadas pelos círculos tracejados em azul.

4.1.2.3 US Pulso-Eco de Contato *Phased-Array*

Foi utilizado como base para esta modalidade US o mesmo procedimento e critério de calibração empregado para o pulso-eco convencional (4.1.2.1), ou seja, a melhor resposta do sinal de retorno. Como a resposta do sinal é observada através do retorno do feixe sônico, os comandos de sensibilidade do equipamento podem ser selecionados de modo a se conseguir as melhores condições de calibração.

A frequência adotada para esta inspeção foi idêntica àquela empregada para o método US pulso-eco convencional, qual seja, 5 MHz. Como pode ser observado na Figura 4.4, o transdutor *Phased-Array*, diferentemente do mono-elemento convencional, é composto por vários cristais, ou elementos piezelétricos. Neste estudo foi empregado um transdutor com dimensões de 60x20x10 mm³ (comprimento x largura x altura) possuindo 32 elementos.

Como esperado, em função da planicidade da superfície de contato do transdutor multi-elementos disponível na empresa, a peça denominada Placa-Plana (Peça 1) encontrou pouca dificuldade de inspeção, pois, nestas circunstâncias, o contato do transdutor com a peça era integral e permanente. Já para as peças Perfil-U (2) e Bordo de Ataque I (3), em função das curvaturas existentes nas mesmas, houve sério prejuízo à capacidade de detecção de danos/defeitos pela técnica em questão.

Todos os procedimentos foram conduzidos na unidade da Embraer S.A. em Eugênio de Melo, São José dos Campos-SP.

Os equipamentos empregados e alguns valores associados à sua calibração são listados abaixo:

- Equipamento Olympus OmniScan[®] MX-U;
- Transdutor SNW1-OL-5L64 com 64 cristais;
- Ganho de 12 dBs;
- Frequência de 5 MHz;

- Escala de 10 mm;
- Lei focal linear 0°;
- Onda tipo longitudinal;
- Elemento tipo 1;
- Agente acoplante na forma de gel.

(a)

(b)

Figura 4.4 (a) Equipamento empregado; (b) Um mesmo transdutor de 32 cristais utilizado no ensaio US *Phased-Array* mostrado em duas vistas distintas.

4.2 Inspeções Radiográficas por Raios-X

4.2.1 Considerações Iniciais

Para a inspeção radiográfica convencional (analógica) por filmes foi utilizado um equipamento de raios-X da Seifert-Eresco® modelo 42 MF W 2, com fundos de escala de voltagem de 200 KV e de amperagem de 10 mA.

Todos os procedimentos foram conduzidos na unidade da Embraer S.A. em Gavião Peixoto-SP.

4.2.2 Calibração e Inspeção

4.2.2.1 Radiografia Convencional (por Filmes)

Foram seguidas as normas MIL-HDBK-793 e ASTM E-1742, embora a ultima não estabeleça dados específicos para radiografias em materiais compósitos de matriz polimérica reforçadas com fibras cerâmicas. Desta forma, foram realizados testes prospectivos obtendo-se radiografias-piloto de modo a se definirem valores adequados de kilovoltagem, miliamperagem e tempo de exposição para uma melhor qualidade da imagem das peças compósitas.

Os equipamentos empregados e alguns dos valores associados à sua calibração são listados abaixo:

- Fonte de radiação Seifert-Eresco® modelo 42 MF W 2 (Figura 4.5);
- Voltagem de 20 kV;
- Amperagem de 5mA;

- Ângulo do feixe de 40°;
- Área do ponto focal de 3 x 3 mm²;
- Filmes Classe I, marca Agfa, Tipo D4;
- Tempo de exposição de 1'30'';
- Distância foco(fonte)-filme de 800 mm.

Figura 4.5 Equipamento de raios-X convencionais (por filmes) empregado neste estudo.

Como normalmente os ensaios radiográficos são realizados pela Embraer em peças metálicas, a execução de ensaios em peças confeccionadas em laminados poliméricos reforçados com fibras de carbono demandou a experiência de técnicos especializados e qualificados como operadores de raios-X, bem como a aplicação de ensaios preliminares alterando-se os valores de algumas variáveis do ensaio, tais como voltagem, tempo de exposição e distância fonte-filme, de modo a obterem-se imagens com melhor definição e resolução. O posicionamento da peça com relação ao feixe de radiação também foi por vezes mudado em busca de um melhor resultado do ensaio.

4.2.2.2 Radiografia Digital 2D e Tomografia Computadorizada 3D

Embora não constituíssem o foco principal do trabalho, durante a condução desta Dissertação de Mestrado houve a oportunidade de se utilizar um tomógrafo computadorizado de raios-X para a obtenção de imagens digitais bi- e tridimensionais a partir de determinadas peças que apresentaram problemas durante sua manufatura pela Embraer.

O equipamento empregado é ilustrado na Figura 4.6, e alguns dos valores associados à sua calibração são abaixo listados:

- Equipamento GE® modelo V|TOME|X S;
- Voltagem de 240 kV (micro-foco) e 180 kV (nano-foco);
- Corrente de 800 μ Amp;
- Resolução de 2 a 4 μ m;
- 3 eixos de manipulação;
- Tamanho máximo da amostra de 420 x 260 mm²;
- Peso máximo das amostras de 10 kg.

Merece ser destacado que não houve, por parte da GE alemã, a qual gentilmente realizou os ensaios em questão, a liberação de um protocolo de procedimento de inspeção por tomografia computadorizada. Esta restrição foi imposta pela empresa no sentido de se evitar a liberação de eventual informação considerada sigilosa e propriedade intelectual da mesma, visto que o referido método e os respectivos equipamentos estão atualmente sob permanente e rápida evolução e desenvolvimento tecnológicos, sujeitando, portanto, aquela empresa a sérios prejuízos no caso divulgação inapropriada e indiscriminada de dados técnicos de seus produtos e procedimentos.

Figura 4.6 Equipamento de radiografia digital e tomografia computadorizada cujo uso foi gentilmente permitido pela General Electric® alemã para a realização de alguns ensaios prospectivos.

4.3 Inspeção Termográfica Pulsada (*Flash*)

4.3.1 Considerações Iniciais

As inspeções termográficas segundo a modalidade pulsada (*flash*) foram gentilmente realizadas pelo Laboratório da *Thermal Wave Imaging Inc.*® situado nos EUA, e, cabe adiantar, nem todas as informações, tanto quanto aos procedimentos de calibração, bem como quanto aos de ensaios propriamente ditos, foram liberadas para este estudo por serem considerados propriedade intelectual da empresa e, portanto, classificadas como sigilosas.

O equipamento empregado pela empresa é mostrado na Figura 4.7; ele utiliza a técnica por ela recentemente patenteada denominada “Reconstituição de Sinal Termográfico” que incrementa a resolução espacial, reduz o borramento e aumenta a relação sinal/ruído da imagem, além de permitir o reconhecimento automático do dano/defeito detectado e, eventualmente, a sua profundidade na peça inspecionada.

Figura 4.7 (a) Equipamento completo de termografia pulsada fabricado pela Empresa Americana Thermal Wave Imaging Inc.[®], a qual realizou algumas inspeções não-destrutivas disponibilizadas nesta Dissertação de Mestrado: (a) Unidade de captura dos sinais termográficos (*Hardware Echo-Therm[®]*); (b) Unidade de processamento dos termogramas (*Software Mosaic[®]*) (Adaptado da Ref.47).

4.3.2 Calibração e Inspeção

Visto que os parâmetros básicos do ajuste do equipamento também não foram formalmente cedidos pela empresa TWI[®], eles foram obtidos a partir de catálogos do equipamento e informações disponibilizadas no respectivo site na Internet:

- Imagem em tempo real: 320 x 250 pixels;
- Sensibilidade térmica: de 5 a 30°C;

- Faixa de medição: 26°C;
- Paleta de cores: Cinza (*white hot x black cold*);
- Campo de visão mínimo: 24° x 18°, 34° x 25°;
- Distância fonte-peça: 250 mm;
- Ajuste de brilho e contraste: automático;
- Emissividade = 1 (corpo negro perfeito);
- Câmera mantida perpendicularmente à área de inspeção e imagem focalizada numa das bordas da peça. Área de inspeção mantida dentro do campo de visão do equipamento.

Com base em algumas referências disponíveis na literatura pode-se também estabelecer em linhas gerais a estratégia básica de condução de um ensaio termográfico pulsado:

- A peça é posicionada fora do alcance de fluxos de ar com temperaturas muito baixas ou muito altas, mantendo-se o ambiente a uma temperatura fixa estabelecida idealmente no intervalo de 10° a 30°C;
- Minimiza-se a influência de fontes e sumidouros de calor adjacentes;
- Realiza-se a limpeza da superfície da peça a ser inspecionada de modo a remover substâncias que possam agir como isolantes ou condutores relativamente à peça de interesse;
- Identificação das áreas a serem inspecionadas contendo descontinuidade(s) de naturezas geométrica e/ou constitucional (dano e/ou defeito);
- Delimita-se a janela de inspeção de modo as descontinuidades fiquem integralmente contidas na mesma;
- Calibra-se o equipamento;

- Aquecem-se as áreas demarcadas com um pulso rápido de energia;
- Realiza-se a captura dos sinais térmicos, efetua-se a análise dos mesmos e gera-se o correspondente termograma em que são visualizados e caracterizados os danos/defeitos identificados.

4.4 Inspeção *Shearográfica*

4.4.1 *Considerações Iniciais*

Nos ensaios de *shearografia* a calibração dos equipamentos empregados foi, assim como nos casos das inspeções ultrasônica e termográfica, efetivada empregando-se principalmente a Placa-Plana (Peça 1). De fato, esta é verdadeiramente uma peça de referência/padrão para todos os métodos de inspeção, tendo sido manufaturada exatamente para tal propósito através da criação intencional de defeitos tipo-delaminação. Obtiveram-se assim os ajustes necessários para empreenderem-se, posteriormente, também as inspeções *shearograficas* das duas outras peças de interesse, quais sejam: Perfil-U (Peça 2) e Bordo de Ataque I (Peça 3).

Assim como em todos os casos de inspeção não-destrutiva anteriormente referidos neste capítulo (realizados pelas empresas GE[®] alemã e ThermalWave[®] americana), as regiões contendo descontinuidades internas (delaminações, descolamentos, vazios, etc...) nas várias peças avaliadas (descontinuidades estas, cabe sempre enfatizar, que foram claramente e inequivocamente detectadas/indicadas por US pulso-eco de contato convencional pela Embraer S.A.) foram reveladas, sem quaisquer restrições, aos responsáveis pelos laboratórios das empresas que operam equipamentos *shearográficos*, quais sejam, Photonita[®] santa-catarinense e Dantec[®] alemã, de modo a acelerar as etapas de calibração e de inspeção não-destrutiva pelos mesmos.

4.4.2 Calibração e Inspeção

4.4.2.1 Ensaio realizado no Laboratório Photonita – Santa Catarina - Brasil

Câmeras com configuração CCD (*charge coupled device*) com uma alta definição de imagem para captar variações dimensionais detectadas nas amostras durante o seu processo de excitação foram montadas sobre um tripé localizado a cerca de 0,5 m da área de interesse, sendo a iluminação (gerando aquecimento de natureza óptica) realizada via sistema da HILIS® (Figura 4.8).

A peça de calibração (Placa-Plana, i.e. Peça 1) foi colocada em uma bancada composta pelo cabeçote de medição (contendo as câmeras e o interferômetro), pela unidade de iluminação a *laser* e pelas lâmpadas alógenas para excitação térmica da amostra inspecionada.

A iluminação da superfície rugosa da Placa-Plana (1) com a luz coerente do *laser*, e o subsequente imageamento da peça empregando-se a câmera CCD gerou padrões estatísticos de interferência, denominados *speckles*, que formam uma impressão digital daquela superfície. Este fenômeno ocorre devido ao espalhamento da luz emitida por uma fonte altamente coerente, como o *laser*, por uma superfície rugosa gerando-se uma distribuição de luz de intensidade aleatória, que dá a superfície uma aparência granular, tal como ilustrada na Figura 4.9. Eventualmente, no caso de superfícies muito lisas (reflexivas), o efeito só pode ser satisfatoriamente obtido através da pulverização de pigmentos pretos e/ou brancos sobre a superfície da peça, empregando-se para isso aerossóis.

Através da superimposição de uma luz de referência, obtida pelo fracionamento da mesma fonte de luz *laser* que deu origem ao padrão superficial *speckle*, obteve-se um interferograma. O carregamento térmico da Placa-Plana (1) por intermédio da iluminação brilhante simultaneamente imposta pelas lâmpadas alógenas causou a deformação da superfície da peça e, conseqüentemente, a alteração do interferograma. A comparação dos interferogramas superficiais imageados antes e após a excitação térmica do

objeto gerou um padrão de franjas de interferência, que revelou, após o ajuste do sistema, as linhas de contorno de deformação nos locais esperados, quais sejam, nas três regiões de geometria circular formadas pela inserção proposital de fita de PTFE. Deu-se assim por concluída a calibração prévia do sistema *shearográfico*.

Figura 4.8 (a) Disposição espacial dos equipamentos e dispositivos típicos da técnica de *shearografia* e da peça a ser inspecionada (Placa-Plana (1)); (b) Aquecimento da Peça (1) via iluminação por lâmpadas alógenas para fins de calibração do equipamento de *shearografia* da Photonita®.

Em adição a esta calibração prévia com base no imageamento dos defeitos/danos propositalis da Placa-Plana (1), há de ser destacado que a mesma também continha marcadores colados em sua superfície, os quais foram detectados automaticamente pelo sistema de aquisição de imagens

durante o processo de calibração, então processados via programa computacional, e, finalmente, exibidos em tempo real. A cor dos marcadores foi, neste caso, adotada como o critério indicativo da qualidade da detecção dos sinais, na forma de imagem das franjas de interferência.

O emprego das câmeras CCD possibilitaram imagens com resolução sub-micrométrica e, portanto, deformações da ordem de sub-mícrons são viabilizadas. Os resultados na forma de imagens são similares aos providos em análises por Elementos Finitos.

Figura 4.9 Padrão *speckle* em cores formado em uma superfície plana (Adaptado da Ref.65).

No caso do imageamento *shearográfico* do Perfil-U (2) e do Bordo de Ataque I (3), que são peças geometricamente muito mais complexas que a

Placa-Plana (1), foram necessários alguns pequenos ajustes de posicionamento e de orientação das mesmas durante as projeções, de modo a obterem-se os melhores resultados possíveis.

Resumidamente, uma vez realizada a calibração dos equipamentos, o ensaio não-destrutivo propriamente dito procedeu em três etapas subseqüentes, quais sejam:

- A peça laminada em fibra de carbono e resina epóxi é iluminada com *laser* de modo a que a sua imagem no estado original (não-excitado) seja capturada pelo interferômetro e câmeras CCD de alta resolução;
- Aplica-se um determinado carregamento na peça compósita de modo a forçar sua deformação, neste caso sendo aplicado calor por radiação térmica advinda de lâmpadas alógenas;
- Na última etapa, as franjas de interferência observadas são diretamente correlacionadas aos defeitos/danos internos contidos na peça.

4.4.2.2 Ensaios realizados no Laboratório Dantec - Alemanha

Por motivos alegados de sigilo industrial, não foram declarados quaisquer procedimentos específicos de calibração nem de inspeção não-destrutiva realizados por esta empresa. Pode-se garantir, no entanto, que aquela seqüência de passos seguidos pela empresa brasileira Photonita Metrologia Óptica[®] foi obedecida pela empresa alemã, eventualmente com pequenas modificações e particularidades relativas a diferenças entre os equipamentos empregados.

Dados do equipamento shearográfico da Dantec Dynamics[®] GmbH:

- Sistema *shearográfico*: Dantec Dynamics[®] Q-400
- Câmeras: 2 FireWire[®] Cameras (1392 x[®] 1040 pixel)
- Lentes: 2 Schneider Kreuznach[®]

- Iluminação: por LED - HILIS[®]
- Programa computacional: ISTR[®] 4D

A Figura 4.10 mostra a câmera CCD para captura das imagens durante a inspeção realizada pela Dantec[®] alemã, segundo a técnica não-destrutiva de *shearografia*.

Figura 4.10 Câmara de captura de imagens *shearográficas* utilizada pela DANTEC[®].

4.5 Inspeção Materialográfica

De modo a confirmar *in loco* a presença de defeitos/danos de manufatura em algumas peças compósitas inspecionadas por métodos END, foram empregadas técnicas materialográficas envolvendo o seccionamento, o lixamento e o polimento para observação de seções transversais ou longitudinais em microscópios ópticos e estereográficos de relativamente baixa ampliação de imagens.

Para isso, algumas peças compósitas foram embutidas em resina poliéster (Figura 4.11) de modo a possibilitar o preparo da superfície a ser posteriormente observada e documentada fotograficamente. Cabe enfatizar que nenhuma das peças submetidas a este procedimento fazia parte do inventário de amostras que foram inspecionadas por técnicas END, seja aqui no Brasil ou no Exterior.

Figura 4.11 (a,b) Amostras materialográficas denominadas respectivamente P1 e P2 preparadas para a verificação da presença e a caracterização óptica/visual *in loco* de defeitos/danos de manufatura em peças laminadas compósitas de grau aeronáutico (revestimentos - setas verdes – com nervuras - setas amarelas).

Utilizou-se inicialmente na inspeção microestrutural um estereoscópio da marca Leica® modelo WildM3B, sendo as imagens digitais coletadas e registradas por intermédio de uma câmera fotográfica digital da marca Canon® modelo Power-Shot A620 com definição de imagem de 7.1 MPixels. Numa segunda etapa, empregou-se um microscópio óptico de reflexão de bancada, da Marca Olympus® modelo BX41M-LED, sendo as imagens digitais

capturadas e documentadas por intermédio de uma câmera fotográfica digital da marca Sony® modelo Cyber-Shot High Sensitivity ISO 1600 com lentes Carl Zeiss® e com definição de imagem de 10.1 MPixels.

Buscou-se, desta forma, caracterizar e documentar a eventual presença de defeitos/danos tais como vazios, bolhas, trincas e, particularmente, delaminações ou falhas de adesão entre camadas individuais das peças laminadas, estas últimas tidas pelo interessado (Embraer S,A,) como as principais discontinuidades responsáveis pelas indicações obtidas durante as inspeções não-destrutivas, particularmente aquelas realizadas com o equipamento US pulso-eco convencional de contato.

4.6 Tabela - Resumo dos Ensaio Realizados

ENSAIOS	US-PE	US-PA	US-S	RX	RX-D	TOMO	TERMO	SHERMO
(1) PLACA PLANA	X	X	X				X	X
(2) PERFIL – U	X	X		X	X		X	X
(3) BORDO DE ATAQUE	X	X		X	X		X	X
(4) PARTE TANQUE COMBUSTIVEL	X	X					X	
(5) NERVURA REVEST. PROFUNDOR	X	X	X		X	X		
(6) BORDO DE ATAQUE	X	X		X				X

Descrição

- US-PE: Ultra-Som Pulso Eco
- US-PA: Ultra-Som Phase Array
- US-S: Ultra-Som Squiter
- RX: Raios-X
- RX-D: Raios-X Digital
- TOMO: Tomografia
- TERMO: Termografia
- SHERMO: Shearografia

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Considerações gerais

Neste capítulo são providos os resultados obtidos durante a inspeção não-destrutiva de três peças laminadas compósitas aeronáuticas principais: (i) Placa-Plana (Peça 1); (ii) Perfil-U (Peça 2); (iii) Bordo de Ataque I (Peça 3), por intermédio de quatro técnicas principais: (i) Ultrassom nas modalidades Pulso-Eco, Transmissão Squirter e Phased Array; (ii) Radiografia Convencional de Raios-X; (iii) Termografia Pulsada (Flash); (iv) Shearografia.

São também fornecidos alguns resultados relativos a ensaios prospectivos de Radiografia Digital (2D) e Tomografia Computadorizada (3D) de Raios-X, assim como de algumas peças laminadas compósitas aeronáuticas adicionais: Tanque de Combustível (Peça 4); Nervura de Revestimento (Peça 5); Bordo de Ataque II (Peça 6).

5.2 Inspeções Ultrasônicas

5.2.1 US Pulso-Eco

Esta modalidade da técnica US é empregada, assim como as outras, na verificação de descontinuidades internas do tipo delaminações, trincas, porosidades, inclusões, etc..., principalmente durante inspeções conduzidas em campo, devido à portabilidade do equipamento, o qual pode inclusive aceitar certo grau de automatização, por exemplo, com a adoção de *plotters* de varredura no plano de inspeção *xy*.

A Figura 5.1 mostra duas posições em que o transdutor (emissor/receptor de ondas ultrasônicas) ocupa duas posições sucessivas ao longo do raio de curvatura do Perfil-U (Peça 2), região em que é relativamente

elevada a probabilidade do desenvolvimento de delaminações e/ou falhas de adesão entre as camadas individuais justapostas do laminado.

(a)

(b)

Figura 5.1 (a,b) Dois posicionamentos consecutivos do transdutor ultrasônico ao longo do comprimento do raio de curvatura principal do Perfil-U (2).

Na presença de uma descontinuidade interna, a configuração de tela tipo US *A-Scan* indicará um pico reflexivo (correspondente à interface material / ar ou vazio) de grande intensidade energética (acusada no eixo y) localizado no espaço de tempo (cuja leitura é feita no eixo x) correspondente à profundidade do defeito a partir da superfície em que é realizada a inspeção (para uma velocidade constante de deslocamento da onda sônica no material).

Na ausência de danos/defeitos, a técnica US pulso-eco indicará somente a presença do chamado eco de fundo, que corresponde ao pico de reflexão da onda sônica na face posterior àquela em que se conduz a inspeção da peça, já que lá existe, assim como na região do defeito interno (ex. delaminação), uma interface material / ar, que são meios com impedâncias acústicas bastante dissimilares entre si.

Assim, enquanto a Figura 5.2a corresponde à tela relativa a uma região sem defeitos no raio de curvatura do Perfil-U (2), quando é possível confirmar a espessura local da peça (3,34 mm), a Figura 5.2b indica a presença de uma grande delaminação localizada a uma profundidade de 1,56 mm. Nota-se que a reflexão do feixe sônico que parte do transdutor é tão intensa no defeito (vide a altura do correspondente pico) que o feixe incidente é totalmente obstruído e praticamente nenhuma energia é transmitida através da descontinuidade geométrica, de sorte que, nestas condições, a posição ocupada pela face traseira ou posterior da peça (posição 3,34 mm) não é mais revelada.

A suposição de que o defeito revelado trata-se de uma delaminação, tem como base o desenvolvimento de um pico de reflexão do feixe incidente com elevada amplitude e de formato pontiagudo. Isto significa que a maior parte do feixe liberado pelo emissor ultrassônico retornou ao receptor, e isso é típico de defeitos perfeitamente perpendiculares ou ortogonais ao feixe, tal como as delaminações (separações de planos paralelos de laminação). Por outro lado, picos de reflexão de mais baixa intensidade, associados a formatos arredondados, são mais característicos de descontinuidades pontuais, tais como vazios e porosidades. Por sua vez, trincamentos não ortogonais ao feixe sônico também são defeitos/danos de manufatura que possibilitam a transmissão de boa parcela da energia sônica por entre e através destes.

Figura 5.2 (a) Tela A-Scan correspondente ao posicionamento do transdutor ultrassônico num determinado local do raio de curvatura do Perfil-U (Peça 2) que é livre de defeitos/danos; (b) Tela A-Scan correspondente ao posicionamento do transdutor ultrassônico em outro local do raio de curvatura do Perfil-U (2), em que está presente uma grande delaminação. As setas amarelas indicam a posição no eixo x (tempo ou profundidade ao longo da espessura da peça) em que se observa (caso “a”), ou deveria ser observado (caso “b”) o eco de fundo. A seta verde indica o pico de energia relativo ao defeito, cuja profundidade é indicada na figura.

Analogamente ao caso acima reportado, a técnica US pulso-eco foi capaz também de indicar a presença de danos/defeitos nas peças compósitas identificadas como 1 e 3, localizados nas posições indicadas por círculos e linhas amarelas nas Figuras 5.3(a) e 5.3(c), respectivamente.

Figura 5.3 Regiões indicadas em amarelo nas quais foram detectados defeitos/danos de manufatura do tipo delaminação (separação entre lâminas individuais) das peças compósitas: (a) Placa-Plana (1); (b) Perfil-U (2); (c) Bordo de Ataque I (3).

5.2.2 US Transmissão (Squitter)

Esta técnica ultrasônica, pertencente à modalidade transmissão ou transparência, emprega colunas d'água como meio de acoplamento entre a peça compósita e os transdutores pizeletricos emissor e receptor, respectivamente. Esta configuração proporciona um elevado potencial de automação da linha de inspeção de peças planas, embora peças com geometrias mais complexas apresentem grandes restrições para sua avaliação, em virtude da natural dificuldade de se manter o contato perfeitamente perpendicular das colunas d'água com as superfícies do espécime. Isto, de fato, ocorreu com as peças Perfil-U (2) e Bordo de Ataque I (3), de sorte que somente a Peça 1 foi inspecionada por esta modalidade END.

Duas imagens da Placa-Plana (1) são apresentadas na Figura 5.4, quando se realiza uma comparação entre dois diferentes níveis selecionados de sensibilidade do equipamento, respectivamente 40 dB (maior sensibilidade, pois sons menos intensos são passíveis de detecção), sob uma frequência de ondas de 1 MHz, e 53 dB (menor sensibilidade), estabelecido naquela mesma frequência do som. No caso da inspeção conduzida sob uma sensibilidade superior do equipamento, uma melhor definição de imagem pode ser observada, revelando a presença dos defeitos deliberadamente criados no laminado compósito plano.

Nota-se que uma escala de cores acompanha as imagens, indicando o grau de atenuação sofrido pelos sinais ultrasônicos gerados pelo transdutor quando atravessaram a espessura da placa. No extremo superior da escala de colorações tem-se a cor branca, que significa atenuação nula (i.e., transmissão total) dos sinais durante o percurso entre os transdutores emissor e receptor, indicando, portanto, uma placa compósita íntegra, compacta e sem danos/defeitos. No extremo inferior, a cor negra sinaliza uma atenuação total do som em virtude da existência de danos/defeitos de notável gravidade no componente. Entre estes dois extremos existe um leque de cores que fornecem um espectro de possibilidades para descrever o grau de perfeição (ou inversamente, de imperfeição) do laminado compósito quando inspecionado ultrasonicamente ao longo do seu plano principal.

Figura 5.4 Resultados de inspeção US-squitter da Placa-Plana (1) para dois níveis distintos de sensibilidade do equipamento operando numa frequência de 1 MHz: (a) 40 dB; (b) 53 dB.

Interessante observar que na Figura 5.4 é fornecido um padrão próprio (específico) de calibração do equipamento SEA[®] - Systems na forma de uma placa laminada compósita contendo vários defeitos intencionalmente criados durante a sua fabricação. Nas regiões não defeituosas, é notável o grau de integridade estrutural da placa (tal como verificado pela coloração predominante pertencente aos mais elevados níveis de atenuação de sinais), bem como a sua homogeneidade estrutural (como denota a coloração homogênea da superfície da placa), contrastando substancialmente com relação às imagens relativas à Placa-Plana (1). Nestas, o grau de heterogeneidade é flagrante, em especial para o maior nível de sensibilidade de sinais empregado (40 dB). Desta forma, enquanto que para 53 dB a imagem indica a massiva presença de regiões com fraca atenuância (i.e., alta transmitância) das ondas ultrassônicas (ilhas na cor salmão), indicando níveis satisfatórios de consolidação ou perfeição do laminado compósito, por outro lado, sob uma sensibilidade de 40 dB, é possível concluir-se que boa parcela do laminado é potencialmente defeituosa (ou danificada), visto que as correspondentes colorações estão no intervalo vermelho/amarelo, que corresponde a uma faixa de atenuação superior à vinculada à cor salmão.

Conclui-se, portanto, que o emprego de uma maior sensibilidade quanto à detecção de sinais ultrassônicos (no caso em questão 40 dB, contra 53 dB) torna o processo de inspeção US mais rigoroso no tocante à garantia da integridade do componente avaliado.

Uma tentativa não originalmente programada no estudo foi realizada para o ensaio de uma peça com certa complexidade geométrica (Nervura Cruzada de Revestimento - Peça 5) por intermédio da técnica US-*Squitter*, a qual, rigorosamente falando, não seria a modalidade mais adequada para tal tarefa, conforme previamente afirmado.

Na Figura 5.5 são apresentadas 4 imagens obtidas da Peça 5, utilizando-se diferentes níveis de sensibilidade de detecção de ondas ultrassônicas. Assim como no caso anteriormente avaliado, percebe-se que maiores sensibilidades de captura de sinais revelam heterogeneidades estruturais e potenciais danos/defeitos de modo mais claro, preciso e confiável.

Entretanto, em quaisquer dos casos apresentados poder-se-ia concluir pela ausência de adesão, ou pela de-consolidação entre camadas laminadas compósitas na região da Nervura em Cruz, o que poderia ser inferido da coloração negra presente, indicando perda total de sinal pelo transdutor receptor (i.e., atenuância total ou, inversamente, transmitância nula). Não obstante, há de se lembrar da baixa eficiência da técnica ultrasônica por transparência na modalidade *squitter*, por fatores já destacados anteriormente no presente texto. Desta forma, há de se desprezarem os sinais correspondentes a coloração negra (que, de fato, revelam a ineficiência da técnica no caso em questão) e se considerarem apenas as demais colorações que se desenvolveram na área de interesse. A Figura 5.5 mostra, para os quatro níveis de sensibilidade empregados (máximo de 19,5 dB, e mínimo de 22,5 dB), a presença de uma pequena região com coloração azul, indicada por seta azul clara, que denota uma forte atenuância local dos sinais ultrasônicos (porém não exatamente significando falha ou limitação operacional do sistema ultrasônico, tal como denotado pela cor negra). Esta região que aparece na cor azulada é um forte indicativo de descolamento entre camadas da estrutura laminada compósita nas proximidades da nervura cruzada.

Interessante observar que para as quatro inspeções realizadas o posicionamento da região defeituosa se mantém fixo, e, além disso, para níveis de sensibilidade decrescente ela tende a ser minimizada (i.e., o tamanho da região diminui), o que é condizente com a conclusão anterior de que melhores definições de imagem são alcançadas durante inspeções não-destrutivas conduzidas sob níveis superiores de sensibilidade do equipamento US.

Este sistema de coloração facilita sobremaneira a tarefa do inspetor em conseguir detectar visualmente as discontinuidades na tela do equipamento. Confirma-se, portanto, que o emprego de uma maior sensibilidade quanto à detecção de sinais ultrasônicos torna o processo de inspeção US muito mais rigoroso no tocante à garantia da integridade do componente avaliado, indicando com maior clareza e confiabilidade os domínios das regiões respectivamente integras e defeituosas/danificadas da peça, componente, elemento estrutural ou da estrutura global.

Figura 5.5 Resultados de inspeção US-squitter da Nervura em Cruz (5) para quatro níveis (decrecentes) de sensibilidade de detecção da intensidade dos ultrasons pelo equipamento.

5.2.3 US Phased-Array

Inspeções ultrassônicas empregando transdutores multi-cristais (32 no caso em questão) foram conduzidas unicamente para a Placa-Plana (1), visto que, assim como no caso anterior (*US-squirter*), haviam serias restrições ao ensaio de peças com geometrias mais complexas, desta feita devido à planicidade e tamanho do elemento sólido transdutor (emissor/receptor).

A Figura 5.6 mostra a tela do equipamento *Phased-Array* em dois estágios distintos da inspeção. O primeiro (Fig. 5.6a) corresponde à passagem do transdutor ultrassônico numa região da Placa-Plana (1) que se encontra em perfeitas condições, de consolidação plena do objeto de interesse segundo os critérios de calibração e de verificação de integridade assumidos para aquela técnica específica, já que, conforme bem mostrou a modalidade US anteriormente avaliada, o grau de perfeição outorgado à placa laminada é uma função inversa da sensibilidade empregada na detecção de danos/defeitos. No segundo caso (Fig. 5.6b), o sensor sobrepõe uma delaminação, cuja presença é imediatamente acusada na forma de uma descontinuidade no sinal gerado na tela, ou no *display* eletrônico digital.

Na Figura 5.6a o *display* revela a espessura da Placa-Plana (1), de 2,53 mm, estimada por esta modalidade avançada de US pulso-eco. Observa-se que, assim como no caso do *US-squirter*, no modo *C-Scan* do sistema *Phased-Array* a leitura da amplitude do sinal é realizada através de uma escala de cores. Deste modo, na Figura 5.6a, a presença de uma coloração local vermelha é um indicativo da proximidade de uma descontinuidade na placa.

Na Figura 5.6b, a representação *C-Scan* permite indicar a presença do defeito interno à peça investigada e, simultaneamente, fornecer uma estimativa de suas dimensões. Por exemplo, nota-se que nem todos os 32 cristais do transdutor *Phase Array* estão posicionados sobre o defeito/dano, mas somente os cristais centrais do mesmo, enquanto os demais (situados nas posições laterais) continuam detectando os sinais sônicos de retorno (eco) gerados na superfície oposta da peça. Isto possibilita, portanto, uma mensuração linear da descontinuidade naquela direção específica de inspeção END.

Figura 5.6 Resultados de inspeção US *Phased-Array* na Placa-Plana (1): (a) Sinais típicos de integridade da placa subjacente ao transdutor, mostrados na forma *A-scan*, à esquerda da tela, e *C-scan*, à direita; (b) Descontinuidade do sinal (interior do círculo tracejado vermelho) decorrente da presença de uma delaminação na posição inspecionada da placa compósita.

Conclui-se, portanto, a partir dos resultados obtidos das três modalidades da técnica Ultrasônica, quais sejam, Pulso-Eco de Contato, Transmissão *Squitter* e *Phased Array*, e dentro dos limites impostos pelos equipamentos empregados no presente estudo, que os dois últimos modos de

operação possuem elevado potencial de automação, boa sensibilidade de detecção e rapidez intrínseca de inspeção, não obstante tenham, na mesma medida, exibido sérias restrições quanto à geometria da peça inspecionada. Por outro lado, a mais simples e convencional modalidade de US pulso-eco, que inclui o contato direto entre o transdutor e a peça, além de feixe unidirecional (sem varredura), apresentou a desvantagem de ser um processo manual (portanto, cansativo, lento e sujeito a interpretação subjetiva do operador, além de ficar a mercê do estado físico e de espírito do mesmo), embora exiba também um determinado potencial de automação não utilizado pela Embraer. De fato, foi esta a única técnica que possibilitou o exame não-destrutivo de todas as peças principais selecionadas para o estudo em questão.

5.3 Inspeções Radiográficas por Raios-X

5.3.1 Radiografia Convencional (por Filmes)

A Figura 5.7 mostra os resultados dos ensaios não-destrutivos realizados através da técnica convencional de raios-X no Bordo de Ataque I (3).

Adotando-se como valores iniciais de voltagem 35 kV e de tempo de exposição 1' 20", obteve-se a imagem mostrada na Figura 5.7a. Observa-se um brilho excessivo do objeto de interesse, indicando uma elevada sensibilização do filme radiográfico em função particularmente do relativamente longo tempo de sua exposição à radiação ionizante. À exceção do bordo de ataque propriamente dito, quando se identifica claramente a montagem realizada entre as duas metades contíguas (coladas) da peça, esta imagem não possibilita a verificação das tramas de fibras contínuas de carbono, nem a eventual presença de delaminações e demais defeitos de manufatura, o que rigorosamente falando constituiria o principal foco do presente trabalho.

(a)

(b)

(c)

Continua na próxima página.

Figura 5.7 (a-d) Resultados diversos de inspeção radiográfica por filmes do Bordo de Ataque I (3) obtidos através da mudança de algumas variáveis de ensaio. A seta amarela indica a existência de uma região de não continuidade da fase de reforço no ápice do bordo de ataque.

Na Figura 5.7b, utilizou-se uma voltagem mais baixa, de 30 kV, e também um ciclo de exposição significativamente mais curto, de 30", visando melhorar a definição de imagem. Entretanto, isto aparentemente não surtiu os efeitos positivos desejados, ou ao menos não na intensidade almejada. Houve a revelação adicional de certas imperfeições na superfície da peça nas proximidades da face, ou revestimento inferior do componente, junto à nervura principal, porém sem que fosse possível caracterizar a presença de descontinuidades internas à peça.

Para a execução da tomada radiográfica mostrada na Figura 5.7c reduziu-se a distância fonte-filme dos 150 mm para 120 mm, o que levou à perda completa do foco da imagem, inviabilizando qualquer tentativa de detecção de danos na peça avaliada

Finalmente, a imagem mostrada na Figura 5.7d foi obtida sob uma voltagem relativamente elevada, de 38 kV, suficiente para impedir a definição das particularidades estruturais da peça, o que inclui a verificação de eventuais defeitos internos à mesma.

Com base nos resultados acima apresentados, pode-se concluir que a Figura 5.7b foi a que exibiu a imagem radiográfica mais apropriada do Bordo de Ataque I (3), apesar das suas várias deficiências já comentadas, as quais impossibilitam uma adequada avaliação da peça quanto aos seus aspectos

estruturais (disposição, orientação e integridade do reforço fibroso) bem como quanto ao grau de consolidação das lâminas individuais durante o processo de manufatura do componente.

A Figura 5.8a mostra a radiografia do Perfil-U (2) obtida empregando-se parâmetros operacionais utilizados anteriormente para o Bordo de Ataque (3). Conforme pode ser verificado, os resultados não foram bons, e as descontinuidades tipo-delaminação ou falta de adesão localizadas no raio de curvatura da peça e indicadas pela técnica ultrasônica pulso-eco convencional de contato (item 5.2.1), não foram reveladas aos raios-X.

A Figura 5.8b mostra novamente o Perfil-U (2) invertendo-se a superfície da peça na qual incidiu a radiação-X, agora aplicada com uma voltagem mais intensa, de 40 kV. Tais mudanças não surtiram quaisquer efeitos no sentido de revelarem os defeitos presentes na curvatura maior da peça.

Figura 5.8 Resultados de inspeção radiográfica por filmes do Perfil-U (2) obtidos através da mudança de algumas variáveis de ensaio (voltagem e sentido de incidência do feixe).

Outra peça que também foi radiografada é o Bordo de Ataque II (6), que possuía acabamento interno de fibras de para-aramida Kevlar®, as quais promovem forte amortecimento acústico prejudicando as inspeções ultrasonográficas, daí a necessidade de outros tipos de END. Utilizaram-se, de início, os parâmetros operacionais empregados na primeira inspeção realizada no Bordo de Ataque I (3), e a imagem resultante é mostrada na Figura 5.9a. Os contornos do perfil geométrico da peça foram razoavelmente definidos, a despeito da "queima" do negativo devida à alta voltagem aplicada e conseqüente superexposição do filme à radiação ionizante. Visando a melhora dos resultados, ensaios adicionais foram conduzidos alterando-se o posicionamento da peça e incrementando-se simultaneamente a voltagem aplicada para 40 kV, o que causou, conforme mostra a Figura 5.9b, o velamento completo do negativo. Na obtenção da imagem mostrada na Figura 5.9c, diminuiu-se a voltagem para 30 kV, assim como a distância fonte-filme para 120 mm, mantendo-se o tempo de exposição em 30'. Pode-se observar uma relativa melhora da imagem na região interna do Bordo de Ataque II (6), em que se notam variações do contorno e do acabamento feito em Kevlar®. A partir destes resultados, foi alterado novamente o valor da voltagem para 35 kV, causando novamente a "queima" da imagem bem como a perda de foco da mesma (Fig. 5.9d).

Continua na próxima página.

Figura 5.9 Resultados da inspeção radiográfica por filmes do Bordo de Ataque II (6), obtidos através da mudança de algumas variáveis de ensaio, tais como comentadas no texto.

Ainda na tentativa de melhorar a definição, ou a qualidade de imagem, e tendo-se como referência os resultados algo decepcionantes anteriormente obtidos e mostrados na Figura 5.9, novos valores foram estabelecidos para as diversas variáveis de ensaio radiográfico (os quais não foram, entretanto, divulgados pela Embraer), e a Figura 5.10 mostra os resultados conseguidos. Nota-se na Figura 5.10a o revestimento interno do Bordo de Ataque II (6), confeccionado em Kevlar®, o qual é notavelmente realçado em relação ao compósito confeccionado em fibra de carbono/resina epóxi no ápice do bordo de ataque.

Figura 5.10 Resultados considerados bem-sucedidos pela Embraer S.A. quanto à inspeção não-destrutiva radiográfica por filmes do Bordo de Ataque II (6): (a) Vista geral; (b) Maior detalhamento.

Já na Figura 5.10b podem ser observados vazios presentes na interface entre estas duas classes de materiais, decorrentes da falta de adesão/consolidação entre as partes durante o processo final de manufatura. Estas potenciais delaminações (ou falta de adesão) desenvolvidas ainda no estágio da fabricação não são aprovadas pelos critérios internos de qualidade da empresa, e foram prontamente detectadas pelo ensaio de ultrassom. Desta forma, pode-se concluir que a radiografia convencional (por filmes) de raios-X apresenta um potencial interessante como método alternativo, ou complementar ao ultrassom, para se detectarem alguns tipos de descontinuidades internas nesta categoria de componente aeronáutico.

5.3.2 Radiografia Digital (2D) e Tomografia Computadorizada (3D)

Nas inspeções radiográficas digitais e computadorizadas por raios-X foram avaliados o Perfil-U (2) e a Nervura em Cruz (5), ambas as peças selecionadas como decorrência de sua grande complexidade geométrica.

A Figura 5.11 mostra a imagem relativa ao Perfil-U (2) obtida por intermédio da aplicação de um feixe de radiação com baixo poder de penetração, destacando-se a trama fibrosa de reforço superficial mostrada em alta definição e em alto relevo.

Já para a Nervura Cruzada (5) (Figura 5.12a) podem ser observados detalhes relativos à região co-curada da peça (contornada por círculo tracejado vermelho), onde potencialmente se desenvolvem defeitos do tipo delaminações e falta de adesão. A Figura 5.12b apresenta um mapeamento em perspectiva da mesma peça, de modo a facilitar a sua visualização global por parte do leitor.

A Figura 5.13 mostra o resultado da inspeção tomográfica computacional 3D relativa à seção central da nervura (região delimitada pelo círculo tracejado amarelo na Figura 5.12b), onde pode ser observada a grande sensibilidade da técnica na detecção e na definição de trincas na matriz resinosa (epoxídica) do compósito, várias delas indicadas por setas amarelas.

Figura 5.11 Resultado de inspeção por Radiografia Digital 2D da curvatura principal do Perfil-U (2).

Continua na próxima página.

Figura 5.12 (a) Resultado da inspeção da Nervura Cruzada do Profundo (5) por intermédio de Radiografia Computadorizada 2D; (b) Mapeamento tridimensional da peça.

Figura 5.13 Resultado da inspeção por Radiografia Digital Tomográfica 3D da região central da Nervura Cruzada Co-Curada do Profundo, manufaturada com pre-pregs carbono-epóxi.

A imagem acima foi obtida a partir da reconstrução dos diversos planos tomográficos obtidos pelo equipamento empregado pela GE alemã, sendo um destes inúmeros planos mostrados na Figura 5.14, em que se verificam as trincas internamente presentes na nervura em cruz.

Figura 5.14 (a) Um dos inúmeros planos tomográficos 2D que deu origem à Figura 5.13; (b) Imagem ampliada (região destacada no quadrado tracejado amarelo).

5.4 Inspeção Termográfica Pulsada (*Flash*)

Para a realização desta categoria de END as peças foram enviadas ao laboratório no Exterior mencionado no Capítulo 4, e, como regra geral, a orientação e o posicionamento dos defeitos/danos internos indicados por ultrassom pulso-eco manual foram repassadas ao respectivo operador de modo que, no caso em questão, fosse adotada a disposição otimizada tanto da fonte emissora de calor na forma de pulso térmico por irradiação eletromagnética, como da câmera termográfica e, deste modo, um máximo desempenho do processo de inspeção fosse alcançado nos experimentos.

É importante salientar que o laboratório responsável pela execução dos ensaios não-destrutivos por termografia infravermelha pulsada não forneceu os dados técnicos dos equipamentos utilizados nem os parâmetros empregados na calibração dos mesmos.

Para a Placa-Plana (1) possuindo três descontinuidades do tipo delaminação (ou falha de adesão) com diâmetros diferentes e profundidades distintas ao longo da espessura do componente, os ensaios realizados podem ser considerados bem sucedidos no sentido de que todas as descontinuidades internas foram indicadas, conforme mostra a Figura 5.15. Interessante observar que a delaminação mais rasa apresentou uma indicação máxima (*hottest spot*) num tempo de apenas 4,5 s após a incidência do pulso de calor sobre a face frontal da peça. Nestes termos, as duas outras delaminações, posicionadas em profundidades maiores na espessura do laminado, demandaram tempos ligeiramente mais longos para a exibição dos correspondentes pontos (regiões) quentes (*hot spots*), em vista do mais longo período de tempo necessário para o acúmulo (ou saturação) de energia (calor) na região situada acima dos danos/defeitos e a conseqüente detecção pela câmara termográfica. De qualquer forma, o tempo de inspeção pode ser considerado significativamente curto e bastante atrativo em termos de rapidez de aplicação em campo, tendo, portanto, um impacto bastante positivo em termos de economia de tempo de inspeção (menor ociosidade da aeronave) e redução dos gastos em termos de homens-hora dedicados à tarefa. Ademais, a

termografia infravermelha pode também ser utilizada, em função de suas características intrínsecas, como um primeiro ensaio de inspeção para se detectarem eventuais danos/defeitos e, uma vez estes tenham sido confirmados, técnicas complementares, por vezes mais precisas, porém invariavelmente mais lentas e demoradas (tal como a ultrasonografia), poderiam ser empregadas para uma melhor definição tanto dos contornos como da profundidade dos danos/defeitos, o que é especialmente importante quando há a necessidade da execução de reparos em estruturas compósitas laminadas.

Figura 5.15 (a) Painel laminado compósito plano, e (b) Resultados obtidos por termografia pulsada aplicada à Placa-Plana (1) contendo três defeitos propositadamente criados na peça.

De fato, a Figura 5.15 revela que a termografia infravermelha não é, ao menos no caso em questão, uma metodologia END habilitada a fornecer imagens com grande nitidez dos contornos dos danos/defeitos, e, portanto, o grau de precisão e qualidade da referida técnica, em termos de

dimensionamento planar das discontinuidades internas, não é tão elevado quanto seria desejável.

A Figura 5.16 mostra os resultados da inspeção não-destrutiva do Perfil-U (2), obtidos na forma de termogramas, cabendo lembrar que as áreas mais predispostas à presença de discontinuidades, tais como indicadas por ultrasonografia pulso-eco manual, são identificadas pela linha amarela.

Figura 5.16 (a) Duas vistas da Peça-2 avaliada, e (b) Imagem termográfica obtida para o Perfil-U (2). Somente a curvatura principal é indicada na figura.

Em virtude da existência da própria curvatura da peça (apontada pela seta magenta e traçada em amarelo na Fig. 5.16), o que implica necessariamente, devido ao dobramento da estrutura laminar, numa espessura local superior àquela exibida pelas abas laterais do componente, a área mais escura (delimitada pela elipse tracejada em amarelo na Fig. 5.16b) gerada durante a inspeção termografia muito provavelmente tenha decorrido do acúmulo local de energia (calor) por efeitos diferenciais mássicos, não

denotando, necessariamente, a presença de eventuais danos/defeitos de manufatura do tipo delaminação/falha de adesão entre camadas. Esta quase certeza de que a indicação termográfica (na forma de uma região mais escura, contínua e homogênea) constitui-se num artefato (ou seja, é uma falsa indicação) advém das inspeções anteriormente realizadas com o ultrassom pulso-eco manual (técnica declaradamente assumida como padrão, ou de referência para os demais métodos END utilizados no presente estudo), a qual acusou a presença de delaminações segmentadas, i.e., não-contínuas, ao longo do comprimento do raio de curvatura principal da Peça-2.

Na inspeção da peça Bordo de Ataque I (3), apresentada na Figura 5.17, uma maior complexidade geométrica foi enfrentada, visto que o revestimento externo laminado é suportado por duas nervuras também laminadas, sendo as partes unidas pelo processo de co-cura. Além disso, o revestimento externo é integralmente recoberto por uma manta metálica de cobre, de modo a dar vazão às eventuais correntes geradas por descargas elétricas atmosféricas (gerando assim a chamada *gaiola de Faraday*), num procedimento invariavelmente executado em componentes primários de aeronaves confeccionados em compósitos de matriz polimérica.

As inspeções demandaram o aquecimento rápido (instantâneo) e a observação da resposta do material/estrutura ao fluxo de calor impingido ortogonalmente ao revestimento nas regiões indicadas pelas linhas amarelas, as quais correspondem em sua maior parte às diversas posições co-curadas (revestimento+nervura) da peça, sendo indicadas também pela maioria das setas magenta. A região de ápice do bordo de ataque, também assinalada com seta magenta de linha amarela, foi manufaturada por colagem, conforme já demonstrado pelas radiografias por filmes (item 5.3.1), e constitui também uma localidade tida como problemáticas relativamente à presença de defeitos de fabricação, novamente tendo-se como base resultados obtidos pela técnica de ultrassom pulso-eco manual pela Embraer.

Na inspeção realizada na face superior (Face 1) do componente verifica-se claramente a presença das regiões de co-cura entre revestimento/nervura dianteira e traseira (elipses tracejadas na cor verde),

além da etiqueta de identificação da peça (elipse laranja). Já na face inferior (Face 2) é revelada a presença de uma faixa mais grossa (elipse tracejada em azul), próxima da co-cura dianteira (uma das elipses verdes), denotando claramente alguma descontinuidade local de relativamente grande monta.

Na parte frontal da peça fica claramente evidenciada a realização de um processo de união entre os dois revestimentos inferior e superior (elipse tracejada vermelha), que dá origem à porção curva do bordo de ataque propriamente dito.

Figura 5.17 (a) Imagem do Bordo de Ataque (3) indicando-se as posições mais críticas do componente, e (b) Resultados de termografia infravermelha (termogramas) obtidos nestas várias regiões da peça.

A Figura 5.18 repete as análises termográficas anteriormente realizadas para a peça Bordo de Ataque I (3), corroborando os resultados já alcançados e, adicionalmente, fornecendo vistas das faces de revestimento superior e inferior, denominadas respectivamente Faces 1 e 2, tais como observadas em vistas de topo.

Figura 5.18 Imagens termográficas (a,b) e de observação visual (c,d) obtidas para a peça Bordo de Ataque I (3) (a,c) Face 1, (b,d) Face 2. Note a correspondência perfeita com a Figura 5.17.

Sob tais condições, a termografia infravermelha novamente é inábil em indicar cabalmente a presença de defeitos/danos de fabricação do componente

estrutural, embora forneça evidências claras de detalhes estruturais tais como as co-curas (elipses verde e vermelha) e a presença de regiões que foram provavelmente reforçadas localmente pela adição de camadas laminadas compósitas adicionais (elipse azul).

A Figura 5.19 mostra o mapeamento termográfico de uma peça compósita laminada manualmente para a confecção de um tanque de combustível de aeronave de asas rotativas.

Figura 5.19 (a,b) Caracterização visual da amostra e dos defeitos internos em peça extraída de um tanque de combustível aeronáutico, e (c) Delineamento de defeito tipo vazios planares em determinado tempo de inspeção térmica de acordo com escala cromática de calibração.

O componente claramente apresenta defeitos de manufatura tais como ondulações (*weaviness*) e vazios planares (devido à estrutura laminar) localizados na região de reforço estrutural do componente, conforme perfeitamente revelados por intermédio de corte e observação visual da seção transversal da peça (Fig. 5.19a).

O mapeamento termográfico revela a presença de uma enorme quantidade de vazios planares alinhados em colunas paralelas entre si. A escala cromática, denotando basicamente a indicação de um defeito a um dado tempo de observação a partir do momento inicial de emissão (injeção) do pulso térmico (*flash*) na superfície frontal (inspecionada) da peça (ou seja, indicando a profundidade e as dimensões planares máximas do defeito), pode, caso o registro seja realizado continuamente ao longo da inspeção, fornecer resultados valiosos quanto ao grau de integridade estrutural das regiões prejudicadas. Por exemplo, possibilitando uma estimativa da espessura residual da parede do componente), o que tem especial importância no caso de estruturas internamente pressurizadas, tal como aquela presentemente avaliada, especialmente por conter líquido altamente inflamável, haja vista o extremo risco de vazamento de combustível em decorrência da profusa presença daqueles defeitos de fabricação.

5.5 Inspeção *Shearográfica*

5.5.1 Considerações iniciais

A inspeção *shearográfica* pelo método térmico (aquecimento por radiação eletromagnética provida por lâmpadas halógenas) foi realizada em duas diferentes ocasiões, respectivamente nos laboratórios das empresas Dantec e Photonita, respectivamente, esta última vinculada à Universidade Federal Santa Catarina.

A calibração dos equipamentos foi, dentro dos estritos limites impostos pelas empresas quanto à disponibilização de dados, descrita no Capítulo 4 desta Dissertação. Cabe enfatizar que, em face do uso posterior dos espécimes cedidos àquelas empresas, na realização de outros tipos de END que não a *shearografia*, a solicitação realizada pelos representantes técnicos da Dantec e Photonita no sentido de se recobrir com tinta branca as superfícies inspecionadas para um melhor contraste de imagens geradas sob a ação das luzes de aquecimento e de *laser*, não foi acatada.

Foram inicialmente enviadas às duas empresas fotos das peças compósitas para um estudo preliminar pelos respectivos especialistas na técnica em questão e, posteriormente, foram postadas, primeiramente para a Photonita e subseqüentemente para a Dantec, as 03 peças para os ensaios propriamente ditos, sendo elas: Placa-Plana (1), Perfil-U (2), e Bordo-Ataque I (3). As áreas de interesse, em que se detectaram danos/defeitos por ultrassom pulso-eco convencional manual de contato na Embraer S.A. foram devidamente informadas aos operadores dos equipamentos *shearográficos*, de modo a facilitar tanto a calibração dos mesmos quanto as tentativas de indicação e de caracterização das diversas descontinuidades presentes nas várias peças.

5.5.2 No Brasil

A Figura 5.20 exhibe os resultados obtidos a partir da Placa-Plana (1), quando se observa, no âmbito geral, uma boa resposta por parte do equipamento desenvolvido pela empresa genuinamente nacional, identificando-se e caracterizando-se claramente duas (as maiores delas) das três inclusões internas com diferentes tamanhos (diâmetros) e profundidades ao longo da relativamente pequena espessura de parede da placa. De fato, esta última característica (profundidade do defeito) não é adequadamente revelada pelos sistemas *shearográficos*, o que pode ser considerada uma importante desvantagem com relação à maioria das técnicas já apresentadas, cujos resultados foram extensivamente discutidos nas sessões anteriores do texto.

Nota-se na Fig. 5.20 que a menor das descontinuidades, embora indicada, não é adequadamente delineada em termos de contornos e dimensões pelo método END em questão.

Já para as peças Perfil-U (2) e Bordo-Ataque I (3), os resultados apresentados na seqüência do texto, respectivamente nas Figuras 5.21 e 5.22, se mostraram de interpretação bastante duvidosa, se comparados aos obtidos primeiramente para a Placa-Plana (1).

Figura 5.20 Imagem resultante do ensaio de *shearografia* da Placa-Plana (1) realizada no Brasil pela empresa Photonita®.

As imagens *shearográficas* relativa ao Perfil-U (2), mostradas na Figura 5.21 e correspondentes respectivamente às vistas interna e externa da peça, tomadas respectivamente nas duas extremidades opostas do componente, indicam apenas e tão somente a existência de uma etiqueta da Embraer empregada para a identificação da peça, localizada na superfície interna da mesma. Desta forma, não é visualizada, e nem fica minimamente evidenciada a presença de qualquer possível delaminação nas curvaturas do Perfil-U, o

que se contrapõe aos resultados anteriormente revelados por ultrassom pulso-eco durante inspeções de controle de qualidade executados na linha de fabricação do componente estrutural compósito.

Figura 5.21 Imagens resultantes do ensaio de *shearografia* do Perfil-U (2) realizado no Brasil, para duas faces de incidência das luzes alógena e laser. Em (a) a seta vermelha indica o sentido de observação adotado em (b).

Com relação ao Bordo de Ataque I (3), cujas tomadas *shearográficas* são exibidas na Figura 5.22, o laboratório Photonita® identificou somente alguns poucos sinais, indicados por setas naquela figura, que podem eventualmente estar relacionados a anomalias estruturais em posições laterais da peça, os quais são potencialmente observados a partir de duas diferentes vistas de topo do componente, respectivamente a partir da face superior (Face 1) e inferior (Face 2), conforme padronização estabelecida previamente nas

Figuras 5.17 e 5.18. De fato, estas posições ditas defeituosas não condizem com os resultados anteriores de END, onde as discontinuidades foram localizadas exatamente nas junções co-curadas da peça, originadas da união entre os revestimentos e as respectivas nervuras internas. A geometria bastante complexa desta peça, associada à presença da manta de cobre laminada que reveste toda a superfície externa do Bordo de Ataque (3), podem em alguma extensão, para a direção de observação adotada neste estágio da inspeção não-destrutiva, ter conduzido a falsas indicações por parte do equipamento *shearográfico* e, conseqüentemente, a interpretações equivocadas por parte de seus operadores. Outra possibilidade seria que os campos de deformação mostrados na Fig. 5.22 decorram de tensões residuais resultantes do processo de manufatura da peça e seu seccionamento mecânico posterior para a extração das amostras de pequeno porte.

Figura 5.22 Imagem resultante do ensaio de *shearografia* do Bordo de Ataque I (3) realizado no Brasil: (a) Face superior (b) Face inferior do componente.

Em justificativa aos resultados não-conclusivos iniciais apresentados pelo laboratório Photonita[®], o correspondente relatório cita literalmente "... a análise da resposta do carregamento térmico de somente uma unidade não revela claramente a presença ou a ausência de defeitos...". Foi também mencionado pela mesma empresa que, normalmente, as peças submetidas aos ensaios de *shearografia* hão de ter suas superfícies externas pintadas de branco de modo a favorecer o contraste das indicações e facilitar a detecção das descontinuidades internas. Conforme anteriormente mencionado no texto, em virtude da realização de END adicionais empregando-se as mesmas peças compósitas avaliadas originalmente pela Photonita[®], mostrou-se inapropriada esta prática sugerida pela empresa, sob pena de inviabilizar possíveis END adicionais (complementares) ao estudo. Além disso, pode-se postular que, num ambiente aeronáutico industrial, e principalmente em condições de campo, a pintura de uma superfície compósita objetivando única e exclusivamente a realização de uma inspeção periódica não-destrutiva se torna uma operação inviável, senão impraticável. Por outro lado, em situações fortuitas, ou de pura coincidência, nas quais a superfície laminar compósita estrutural de uma aeronave em serviço (ex. fuselagem, asa, empenagem) já esta originalmente recoberta com tinta branca como resultado da pintura selecionada e executada pela própria operadora, a condução do END *shearográfico*, é, teoricamente, favorecida ou privilegiada.

Em face dos resultados algo decepcionantes obtidos numa primeira fase de ensaios, uma nova tentativa foi realizada juntamente ao laboratório Photonita[®] visando obterem-se resultados de melhor qualidade através da adoção de uma orientação, ou posicionamento mais apropriado das peças 2 e 3, Perfil-U e Bordo-Ataque I, respectivamente, relativamente tanto à iluminação alógena, para o seu aquecimento, quanto à luz *laser*, para sua inspeção propriamente dita.

Numa segunda tentativa, as áreas mais críticas, contendo os defeitos/danos de manufatura ficaram diretamente na linha de tiro (*sight-of-line*) da câmera *shearográfica*. Para o Perfil-U (2), isto pode ser observado nas Figuras 5.23a-d, sendo o imageamento realizado ao longo do eixo longitudinal

da peça, numa direção ortogonal àquela em que se efetivou a primeira batelada de ensaios, cujos maus resultados foram apresentados na Figura 5.21.

Continua na próxima página.

Figura 5.23 Imagens resultantes de ensaios adicionais de *shearografia* conduzidos para o Perfil-U (2) na Photonita: (a) = (b), e (c) = (d), exceto pelo uso de contrastes diferenciados para tentar melhor evidenciar a presença de danos/defeitos.

As imagens *shearográficas* agora mostradas para a Peça-2 exibem claros sinais de deslocamento/deformação por cisalhamento (*shear-strain*) desenvolvidos nas áreas consideradas mais críticas da peça, quais sejam, nas principais curvaturas da mesma, onde foi originalmente detectada a presença de delaminações (ou falta de adesão)³ durante ensaios anteriores de ultrassom pulso-eco convencional manual de contato.

Conforme comentado, as imagens acima fornecidas correspondem a vistas de seções transversais do componente avaliado, localizadas nas proximidades de uma (Fig. 5.23a,b), e outra (Fig. 5.23c,d) extremidade da peça. Nestes termos, o campo de visão é mais limitado, não obstante mais privilegiado no sentido de até mesmo possibilitar uma visão direta do defeito/dano, se comparado àquele correspondente à primeira tentativa realizada (vide Fig. 5.21). Desta forma, não se pode garantir que os danos visualizados e setados na Figura 5.23 correspondem exatamente àqueles detectados durante os ensaios de ultrassom na modalidade pulso-eco, por exemplo, quando a varredura foi realizada longitudinalmente sobre as curvaturas da peça em questão.

Por sua vez, nesta segunda batelada de END o Bordo de Ataque I (3) também foi inspecionado segundo uma orientação mais apropriada para a detecção de discontinuidades indesejáveis oriundas do processo de manufatura, conforme mostram as vistas de perfil apresentadas na Figura 5.24.

³ Embora por vezes utilizados indiscriminadamente, os termos “delaminação” e “falta ou falha de adesão” possuem significados próprios e bem estabelecidos. Enquanto a falta ou falha de adesão constitui claramente um defeito de manufatura, em que a união entre as lâminas individuais do laminado nem chegou a ocorrer, ou ocorreu de modo insuficiente durante o processo de fabricação, uma delaminação pode ser considerada como um dano originado por impacto ou outro evento mecânico em uma região originalmente íntegra do material/peça, na qual existia previamente a adequada adesão entre as camadas individuais compósitas. Por outro lado, uma delaminação pode, eventualmente, surgir como decorrência da adesão insatisfatória entre as camadas individuais do laminado, associada, por exemplo, à presença de tensões residuais originadas durante a manufatura; nestas circunstâncias, a delaminação criada poderia ser rigorosamente classificada como um defeito de fabricação.

Continua na próxima página.

Figura 5.24 Imagens resultantes de END complementares de *shearografia* conduzidos para o Bordo-Ataque I (3) na Photonita: (a) Região próxima à nervura secundária; (b) e (c) Região próxima à nervura principal. (b) = (c) exceto pelo uso de contrastes diferenciados para tentar melhor evidenciar a presença de danos/defeitos.

Para esta peça, visto que o revestimento externo é bem mais delgado que as correspondentes nervuras a ele co-curadas, respectivamente 1,5 contra 2,8 mm, falsas indicações podem ser originadas em função das diferentes tonalidades de cinza que eventualmente decorrem da mencionada diferença de espessura entre as partes do componente. Isto é especialmente verificado na Figura 5.24a.

De modo geral, vários pontos foram indicados por setas brancas e contornos vermelhos na Fig. 5.24, em análise conduzida por integrantes da equipe da Photonita[®], correspondendo, de acordo com a avaliação daqueles, a defeitos/danos internos ao Bordo de Ataque (3) inspecionado. Tais regiões, invariavelmente localizadas na face lateral da peça, e remotamente das juntas co-curadas que unem o revestimento às nervuras, não correspondem aos defeitos ultrasonicamente e radiograficamente detectados no presente estudo.

Ademais, é interessante também notar que, em algumas regiões claramente contendo sinais de descontinuidade na referida peça, tal como especialmente aquela contida no interior do círculo tracejado em amarelo (ex. Figs 5.24b,c), nenhuma seta foi utilizada pelos operadores da unidade *shearográfica* para indicar a presença de um potencial defeito de manufatura do componente estrutural. Considerando que instruções básicas foram fornecidas pelos interessados aos inspetores quanto à posição preferencial do desenvolvimento de defeitos nas peças, este fato indica claramente que a posse e a operacionalização de um equipamento END por si só não são condições necessárias e suficientes para o sucesso de uma inspeção não-destrutiva: é preciso também, e tão importante quanto, realizar as devidas interpretações dos sinais e imagens fornecidos pelo sistema.

A sugestão feita pelos operadores do sistema *shearográfico* artesanalmente construído no País para a reprodução de idênticos experimentos, nas mesmas peças, porém agora se empregando não mais excitação térmica das amostras, mas sim vácuo ou vibração ultrasônica, assim como a proposta de estudos comparativos entre estas amostras contendo defeitos de manufatura e amostras geométrica e materialmente idênticas, porém sem a presença de falhas de fabricação (amostras íntegras), não foram acatadas pelos interessados, tendo em vista tanto o relativamente exíguo tempo disponível para a finalização dos novos experimentos, quanto a ausência de garantia de sucesso, por parte dos proponentes, dos novos experimentos por eles mesmos arquitetados.

5.5.3 No Exterior (Alemanha)

Para os END *shearográficos* conduzidos pela Dantec® Alemã foi acordado entre as partes o envio de uma única peça, o Perfil-U (2), visto que a parceria celebrada tinha meramente a conotação de natureza ilustrativa do potencial de detecção de danos/defeitos em laminados compósitos pelo equipamento mundialmente reconhecido fabricado por aquela empresa. A escolha do Perfil-U (2) se deu com base na sua geometria relativamente

complexa e na sua representatividade quanto aos tipos de defeitos/danos de maior interesse para o presente estudo. As informações enviadas ao laboratório no Exterior incluíram: orientação e posicionamento das indicações, e melhores resultados obtidos por intermédio de outras técnicas, porém sem mencionar o tamanho das delaminações.

A Figura 5.25 mostra uma imagem obtida a partir de uma das faces externas do Perfil-U, que não corresponde exatamente às regiões de principal interesse para a pesquisa, porém as inclui (curvaturas da peça), em que foi detectado um risco profundo (que tanto pode ter sido um defeito, como um dano de manufatura) associado provavelmente à fratura de fibras, o qual já era visualmente perceptível a um observador mais atento.

Figura 5.25 Imagem resultante de ensaio *shearográfico* conduzido pela DANTEC no Perfil-U (2), indicando um defeito / dano externo (setado em amarelo) que já era perceptível a olho nu.

A Figura 5.26 apresenta uma imagem *shearográfica* da face externa do Perfil-U, contígua àquela imageada na figura anterior, e que inclui parcialmente uma das curvaturas de interesse da peça, a qual contém danos/defeitos dos

tipos delaminação/falha de adesão. Nesta ocasião, a técnica END detectou regiões na curvatura que podem estar diretamente vinculadas à presença daqueles defeitos/danos, porém a identificação destes últimos, ou mesmo uma possível correlação direta dos sinais obtidos com as discontinuidades geométricas, não foram realizadas de modo cabal ou conclusivo.

Figura 5.26 Imagem resultante de ensaio *shearográfico* conduzido pela DANTEC no Perfil-U (2), indicando a provável presença de delaminação/falha de adesão numa das curvaturas da peça.

Na Figura 5.27 os feixes de iluminação alógena e de inspeção por *laser* são lançados diretamente sobre a região de interesse (curvatura) na face externa do Perfil-U, e os resultados obtidos na forma de contraste entre partes

íntegras e defeituosas/danificadas podem ser considerados mais interessantes e significativos frente aqueles observados nas figuras anteriores. De qualquer modo, nenhuma afirmação cabal ou conclusiva foi fornecida pelos alemães responsáveis pela condução do END *shearográfico*.

Figura 5.27 (a,b) Imagens resultantes de ensaio *shearográfico* conduzido por empresa alemã no Perfil-U (2), reforçando o diagnóstico de provável presença de delaminação/falta de adesão nas regiões de curvatura da peça circundadas por elipses tracejadas vermelhas.

Como conclusão deste item, pode-se dizer que a técnica *shearográfica* apresentou resultados satisfatórios somente para a peça Placa-Plana (1), porém com sensibilidade prejudicada na detecção de defeitos menores que 10 mm em diâmetro (caso da menor delaminação propositalmente inserida na peça planar). No caso de ambas as peças Perfil-U (2) e Bordo de Ataque I (3), tanto o equipamento da Photonita® quanto o da Dantec® não foram suficientemente eficazes para a clara e inequívoca detecção, identificação e definição de delaminações e/ou falhas de adesão internas.

5.6 Inspeção Materialográfica

De modo a confirmar *in loco* a presença de defeitos/danos de manufatura em algumas peças compósitas inspecionadas por métodos END, as mesmas foram avaliadas, após a preparação adequada de planos específicos de observação, em estereoscópio e em microscópio óptico, ambos operando em modo de reflexão.

Buscou-se, desta forma, caracterizar e documentar defeitos típicos de estruturas laminadas compósitas poliméricas, tais como vazios, bolhas, trincas e, particularmente, delaminações ou falhas de adesão entre camadas individuais, bem como aqueles decorrentes do processo de co-cura executado entre revestimentos e nervuras.

A Figura 5.28 mostra as imagens estereoscópicas obtidas para dois revestimentos com nervura que foram reprovados durante inspeções ultrasonográficas do tipo pulso-eco convencional manual de contato conduzidas pela Embraer S.A. Conforme destacado no item 4.5 desta Dissertação, nenhuma das duas peças submetidas a este procedimento (respectivamente denominadas P1 e P2) faziam parte do inventário original de amostras que foram inspecionadas pelas várias técnicas END, seja aqui no Brasil ou mesmo no Exterior.

A Figura 5.29 mostra as imagens capturadas através de microscopia óptica a partir das peças P1 e P2, em que são verificadas diversas anormalidades (não-conformidades) microestruturais.

Continua na próxima página.

(c)

(d)

Figura 5.28 Imagens estereoscópicas obtidas a partir de amostras materialográficas preparadas para a verificação da presença e caracterização *in loco* de defeitos/danos de manufatura em peças laminadas compósitas de grau aeronáutico: (a,b) Revestimento com nervura P1; (c,d) Revestimento com nervura P2.

(a)

(b)

(c)

Continua na próxima página.

Continua na próxima página.

Figura 5.29 Imagens capturadas em microscópio óptico de bancada a partir das amostras materialográficas denominadas P1 e P2 preparadas para a verificação e caracterização *in loco* de defeitos/danos de manufatura em peças laminadas compósitas de grau aeronáutico: (a-c) Regiões debilitadas de fibras no revestimento com nervura P1; (d-f) Camada externa polimérica espessa contendo bolhas aprisionadas no processo de cura do revestimento com nervura P2; (g) Trincamento de longo alcance na alma da junção co-curada do revestimento com nervura P1.

Os resultados acima exibidos na Figura 5.29, obtidos a partir da análise materialográfica das amostras P1 e P2, fornecem evidências de que defeitos e danos de fabricação, tais como regiões exibindo excesso de resina, profusa presença de bolhas e vazios em superfícies de acabamento contendo as telas metálicas condutivas de cobre, porventura até mesmo a presença destas telas nas superfícies compósitas, trincas intra- e translaminares internas em partes co-curadas, e camadas superficiais excessivamente espessas de resina polimérica pura, podem, em alguma extensão, além da eventual presença de delaminações/falhas de adesão (estas últimas descontinuidades não sendo verificadas nas peças P1 e P2), podem potencialmente ter causado indicações nos equipamentos END empregados no presente estudo.

Infelizmente, nenhuma das peças inspecionadas não-destrutivamente pelas empresas internacionais (ThermalWave americana, Dantec e GE alemãs) foram retornadas ao Brasil, talvez por deliberadamente tentarem estas companhias evitar possíveis comparações entre as várias técnicas END (comparações estas que constituem exatamente a motivação básica da presente Dissertação de Mestrado), e o risco de exporem as limitações dos respectivos equipamentos e técnicas de termografia ativa, *shearografia* e tomografia computadorizadas de raios-X. Desta forma, aquelas peças enviada ao Exterior não puderam, como seria o ideal, ser submetidas a uma avaliação metalográfica subsequente por seccionamento, lixamento, polimento e observação *in loco* de seus defeitos e danos de manufatura, tal como exatamente experimentaram as peças P1 e P2 no estágio final deste trabalho de Mestrado.

Além disso, merece ser destacado que, devido à recente implementação do sistema $6\sigma^4$ pela Embraer S.A., peças similares àquelas que não foram retornadas ao Brasil a partir de ensaios END conduzidos no Exterior, foram completamente descartadas dos depósitos da empresa, de sorte (ou azar) que não houve oportunidade para tomarem-se peças similares, as quais muito provavelmente continham os mesmo defeitos / danos àqueles presentes nas peças originais inspecionadas, e realizarem-se as tão desejadas e necessárias avaliações metalográficas empregando-se estereoscópicos e microscópios ópticos.

⁴ *Seis Sigma (6σ) é basicamente um conjunto de práticas para melhorar sistematicamente os processos ao eliminarem-se defeitos. Um defeito é definido como a não conformidade de um produto (caso presentemente estudado nesta Dissertação), ou serviço com suas especificações. Pode ser também definido como uma estratégia gerencial para promover mudanças organizacionais, fazendo com que se chegue a melhorias nos processos, produtos e serviços para a satisfação dos clientes. Diferente de outras formas de gerenciamento de processos produtivos ou administrativos, o 6σ tem como prioridade a obtenção de resultados de forma planejada e clara, tanto de qualidade como e, principalmente, financeiros.*

Desta forma, *a priori*, a não ser pela Peça 1, qual seja, a Placa-Plana compósita contendo os três defeitos tipo-delaminação propositadamente criados durante o processo de manufatura na Embraer S.A. através da introdução, em diferentes posições no plano da peça, e em três distintas profundidades da mesma, de pequenos insertos finos de formato circular fabricados em politetrafluoretileno (Teflon[®]), pode-se apenas especular (mesmo considerando-se os resultados obtidos via inspeções ultrasônicas) que as delaminações foram o tipo de defeito/dano predominantemente causador das indicações mais evidentes obtidas durante as inspeções NDE realizadas no Perfil-U (Peça 2) e no Bordo de Ataque I (Peça 3), porém, não se pode garantir e afirmar cabalmente a presença destas descontinuidades nas mesmas.

Visando re-confirmar a capacidade de detecção de danos/defeitos pelo método ultrasonográfico pulso-eco manual convencional, as peças embutidas em resina poliéster P1 e P2, mostradas originalmente na Figura 4.11, foram novamente submetidas ao referido END na Embraer S.A. após terem expostas cuidadosamente a face de revestimento contendo a malha de cobre (Fig. 5.30), oposta àquela em que se situa a correspondente nervura.

Realizado o END, uma marcação na face exposta das duas peças foi feita com caneta de tinta azul, mostrando as exatas regiões situadas sob as respectivas nervuras em que indicações foram ultrasonicamente obtidas. Estas faixas azuis são claramente visualizadas na Figura 5.30, e identificadas por intermédio de setas vermelhas.

É surpreendente verificar, em ambos os casos (P1 e P2), que as faixas azuis indicativas da presença de defeitos/danos não comportam a região de superfície que foi analisada em estereoscópio e microscópio óptico de reflexão, indicadas por setas verdes na Figura 5.30, e cujos resultados foram extensivamente ilustrados e discutidos nas Figuras 5.28 e 5.29. É exatamente nesta última figura que está clara e inequivocamente delineada uma extensa trinca que varre praticamente toda a extensão da alma co-curada do revestimento e nervura. Conclui-se que a inspeção US pulso-eco, tida como referência no presente estudo, falhou na detecção deste dano/defeito.

(a)

(b)

(c)

Figura 5.30 (a) Amostras P1 e P2 submetidas a inspeções complementares US pulso-eco manual convencional de contato, indicando-se, com traços azuis (apontados por setas vermelhas), as posições na face inferior dos revestimentos, situadas logo abaixo das respectivas nervuras, em que se detectaram defeitos do tipo separação entre camadas (delaminações/falha de adesão). Note que, coincidentemente, as superfícies indicadas por setas verdes, outrora analisadas na primeira sessão de imagens materialográficas (vide respectivamente Figs 5-28 e 5-29), excluem a região em que o US pulso-eco indicou a existência de descontinuidades (não-conformidades) nesta segunda rodada de END; (b,c) Detalhamento das amostras P1 (b) e P2 (c) em que as setas verdes indicam o plano metalográfico analisado e exibido nas Figuras 5.28 e 5.29, e as setas azuis claras apontam para o plano paralelo oposto das amostras.

Finalmente, a amostra P1 foi cuidadosamente re-embutida de modo invertido com relação àquele apresentado na Figura 5.30, de modo que a superfície de observação metalográfica fosse, desta feita, oposta àquela apontada pela seta verde, cujas imagens obtidas foram anteriormente exibidas nas Figuras 5.28 e 5.29.

Este procedimento objetivou verificar se o ensaio ultrasônico mais recentemente conduzido havia indicado corretamente a presença de uma verdadeira descontinuidade. Conforme mostra a Figura 5.31, o procedimento END foi muito bem sucedido, haja vista a presença de trinca que cruza praticamente toda a alma da seção co-curada entre o revestimento e a nervura compósitas.

Figura 5.31 Imagem capturada em microscópio óptico de bancada a partir da amostra metalográfica P1 re-embutida em resina poliéster para observação de seção transversal oposta àquela originalmente avaliada e cujos resultados foram apresentados nas Figuras 5.28 e 5.29. Note que o trincamento de longo alcance na alma da junção co-curada do revestimento com nervura questão já havia sido anteriormente detectado e caracterizado na Fig. 29g.

Considerando-se os resultados das análises metalográficas realizadas nas duas faces da amostra P1, quais sejam, aquelas indicadas

respectivamente por setas verde e azul claro na Figura 5.30b,c, e levando-se em conta os resultados de inspeção US pulso-eco manual convencional, um esquema-resumo pode ser derivado, o qual é ilustrado na Fig. 5.32.

Figura 5.32 Esquema-resumo mostrando a incongruência entre os resultados de END obtidos por intermédio de inspeção por ultrasonografia pulso-eco na modalidade convencional com varredura executada em modo manual.

Conclui-se da Figura 5.32 que: (i) o trincamento da alma da peça P1 muito provavelmente se estende por toda a seção longitudinal da alma co-curada do componente; (ii) o ensaio ultrasônico pulso-eco manual convencional (técnica adotada como padrão para as outras mais modernas avaliadas na presente Dissertação) não conseguiu detectá-la por toda a extensão do comprimento da peça.

Dada à gravidade do defeito/dano perdido na inspeção em questão, variáveis de processo, tais como orientação, posicionamento, direção, velocidade e sentido de deslocamento do transdutor ultrasônico, relativamente à orientação do trincamento presente na peça avaliada, assim como características intrínsecas do equipamento empregado, tais como, sensibilidade, resolução, razão sinal/ruído, sem mencionar as variáveis operacionais, tais como frequência e amplitude de onda, hão de ser revistas e readequadas para o caso em tela.

Uma possibilidade aventada, de que as trincas pudessem ter aberturas muito distintas entre si, de modo a que a perda de uma indicação deveu-se ao trincamento ser, no jargão industrial, “muito fina”, parece não aplicar-se ao caso presentemente avaliado. Prova disso é a Figura 5.33, que corresponde a ampliações de imagem das áreas destacadas em linhas tracejadas amarelas na Figura 5.32. Rigorosamente analisando, posto que as ampliações de imagens são idênticas para ambos os casos ilustrados na Figura 5.33, a “trinca perdida” é, aparentemente, a que exhibe maior abertura, de modo que, a depender deste único quesito, a hipótese acima não se sustenta.

Nota-se que ambas as Figuras 5.32 e 5.33 não deixam margem para dúvidas sobre o fato de que os defeitos/danos observados nas duas faces avaliadas na amostra P1 constituem uma descontinuidade única, que varre todo o comprimento da porção avaliada da peça. Neste sentido, salta aos olhos a enorme semelhança que se estabelece entre as respectivas inclinações das trincas, as quais (inclinações) ocorrem de modo invertido, dado que, não obstante as trincas tenham sido documentadas em planos paralelos entre si, os sentidos de observação destas pelo pesquisador eram também invertidos um com relativamente ao outro.

Figura 5.33 Ampliação das imagens de áreas destacadas em linhas tracejadas amarelas na Fig. 5.32: (a) Trinca não detectada por ultrasonografia; (b) Detectada.

Por fim, a Fig. 5.34 apresenta a imagem obtida por intermédio de análise materialográfica do defeito de manufatura que foi ultrasonicamente identificado na peça P2 durante a segunda rodada de testes. O defeito basicamente constitui-se na presença de um filme plástico que protege os tecidos de fibras de carbono pré-impregnados com resina utilizados na confecção do componente estrutural, e que foi “esquecido” pelo operador durante o processo de manufatura da peça por laminação manual. Este evento é considerado casual, porém não raro, sendo que todas as peças assim produzidas são inspecionadas em 100% dos casos, de modo a se evitarem este e outros desvios ou não-conformidades de produção. Vale mencionar que este defeito de fabricação da peça P2 não foi visualmente observado, nem ultrasonicamente detectado, na face de observação materialográfica oposta a esta ilustrada na Figura 5.34.

Digno de nota é também o fato de que este defeito presente em P2 está orientado em uma posição extremamente favorável à detecção por ultrassom em inspeções nas quais o transdutor se desloca na face de revestimento que contém a malha metálica de cobre, seguindo o trajeto correspondente ao comprimento da nervura do componente. Em tais circunstâncias, o feixe ultrassônico incide de modo perfeitamente ortogonal ao plano do defeito, de sorte que é máxima a possibilidade de sua indicação. Esta situação é bastante distinta daquela observada na peça P1, dado que a estratégia de inspeção (notadamente o trajeto de deslocamento do transdutor) é idêntica à anterior, porém as faces das trincas (defeitos) não são atingidas perpendicularmente pelo feixe sônico, mas sim em ângulo próximo a 45° , pelo menos em boa parte da seção transversal do componente (já que certa parcela da extensão das trincas é paralela ao plano de deslocamento do transdutor, caracterizando assim uma condição ótima para sua detecção por END ultrassom).

Finalmente, é importante comentar que as imagens obtidas por intermédio de estereoscópio, ilustradas na Fig. 5.28, embora de grande beleza plástica, não forneceram quaisquer evidência da presença de defeitos do tipo trincamento (caso específico da peça P1), que só foram posteriormente identificadas por intermédio de microscopia óptica de reflexão.

Figura 5.34 (a) Imagem capturada em microscópio óptico de bancada a partir da amostra materialográfica P2 re-embutida cuidadosamente em resina poliéster para observação da seção transversal diametralmente oposta àquela originalmente avaliada e cujos resultados foram apresentados em algumas da Figs 5.29. A seta vermelha indica a direção e sentido de injeção de ondas ultrasônicas durante a inspeção END do componente.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir dos experimentos END e das análises materialográficas realizadas em peças laminadas compósitas poliméricas aeronáuticas contendo danos/defeitos de manufatura permitiram concluir que:

1 – Ultrasonografia (US)

A modalidade Pulso-Eco convencional de contato, não obstante tenha sido conduzida em modo manual, foi a única das três (03) técnicas US empregadas que possibilitou a avaliação não-destrutivo de todas as principais peças selecionadas, visto que seu transdutor de pequenas dimensões permitiu o acoplamento adequado às superfícies planas e curvas. As técnicas de transmissão *Squirter* e de *Phased Array*, embora mais rápidas e com maior potencial de automação, além de proporcionar uma menor subjetividade de interpretação por parte do operador que a Pulso-Eco convencional, não puderam ser aplicadas em peças curvas e/ou mais complexas. No laminado compósito plano, seus resultados foram muito satisfatórios, em especial no modo *Squirter* por proporcionar um mapeamento completo dos danos/defeitos.

2 – Radiografia de raios-X (RX)

A RX convencional por filmes exibiu um potencial interessante como método alternativo, ou complementar ao ultrassom para a detecção de alguns tipos de descontinuidades internas em peças laminadas compósitas. A RX digital (computadorizada) em modos 2D e 3D exibiram grande sensibilidade na detecção e definição de trincas na matriz polimérica em peças compósitas de geometria mais complexa, a despeito do seu elevado custo se comparada à modalidade RX analógica.

3 – Termografia (TIV)

O tempo de inspeção TIV no laminado compósito plano contendo descontinuidades com variadas dimensões e profundidades foi

excepcionalmente curto (de 4 a 5 s), se mostrando, portanto, uma técnica muito interessante para, pelo menos, o mapeamento rápido de danos/defeitos em inspeções preliminares seguido pela aplicação de técnicas complementares mais lentas e com maior habilidade para a definição dos contornos das descontinuidades, o que é especialmente desejável na execução de reparos de peças compósitas.

4 – Shearografia (SHR)

O equipamento SHR nacional indicou claramente as maiores inclusões internas na placa-plana compósita, porém a interpretação dos resultados em geometrias mais complexas se mostrou bastante duvidosa. O equipamento SHR alemão detectou regiões na curvatura que podem estar associada à presença de defeitos/danos, porém a correlação direta dos sinais obtidos com as descontinuidades geométricas não foi realizada de modo conclusivo.

5 – Exame Materialográfico (EM)

Obtiveram-se evidências visuais *in loco* da profusa presença de danos/defeitos de manufatura, além da existência de detalhes construtivos nas peças compósitas mais complexas (ex. revestimento/nervura co-curados), tais como zonas ricas em resina, camadas superficiais espessas de resina polimérica pura com elevada concentração de bolhas, trincas intra- e translaminares internas e malha metálica de cobre, os quais podem ter sensibilizado, em maior ou menos extensão, os equipamento END, juntamente com a eventual presença de delaminações/falhas de adesão nas respectivas peças avaliadas. Desta forma, no momento, pode-se apenas especular que delaminações/falhas de adesão entre camadas foram o tipo de defeito/dano predominantemente causador das indicações mais evidentes obtidas nas inspeções NDE de peças curvas e/ou mais complexas, as quais, em sua maioria, não puderam, por uma ou outra razão, ser examinadas materialograficamente. Além disso, foi cabalmente demonstrado que, mesmo a técnica US pulso-eco manual convencional de contato, adotada como referência neste estudo para as demais técnicas END concorrentes, pode

perder indicações de trincas longas e muito bem definidas. Por fim, demonstrou-se que imagens estereoscópicas de superfícies planas adequadamente preparadas para exames materialográficos não forneceram evidências confiáveis da presença, ou ausência, de defeitos/danos do tipo trincamento, os quais são claramente revelados por intermédio de microscopia óptica de reflexão.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados experimentais obtidos na presente Dissertação de Mestrado, e tendo-se como referência a literatura apresentada no Capítulo 2, além da tomada de conhecimento de métodos END recentemente desenvolvidos para os Laminados Compósitos Sólidos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Longas, os quais se encontram ainda em fase de certificação, podem-se propor alguns estudos complementares a serem conduzidos num breve futuro:

- a. Realização de ensaios Ultrasônicos pelo método de contato Pulso-Eco *Phased Array* automatizado com mapeamento de danos/defeitos por varreduras tipo C e D (*C e D-Scan*) empregando-se equipamentos ora disponíveis no mercado, e transdutores que possuam tamanho e geometria apropriados para a inspeção de placas planas e curvas contendo descontinuidades de dimensões modestas;
- b. Novas tentativas de realização de Tomografia Computadorizada de Raios-X em peças mais complexas em que se deseje alta definição e qualidade de imagens para a visualização de pequenos detalhes construtivos, defeitos de fabricação, danos gerados durante a manufatura, na montagem, na manutenção ou em serviço, com resolução da ordem de microns;
- c. Aplicação da técnica de Termografia Infravermelha nas suas diversas modalidades, pulsada (como já parcialmente testada neste estudo), modulada (*lock-in*), por excitações ultrasônica (vibrotermografia) e via correntes parasitas;
- d. Aplicação da técnica *Shearográfica* naqueles mesmos modos de excitação acima sugeridos para a Termografia, de preferência com as duas técnicas sendo aplicadas simultaneamente, de maneira a possibilitar um confronto direto entre as potencialidades das duas metodologias;

- e. Realização de inspeções com métodos ainda em fase de certificação para as indústrias aeronáutica e aeroespacial, tais como o Ultrassom-laser (*Laser-Ultrasonics*);
- f. Confirmação dos resultados obtidos por métodos END através da comparação com dados levantados a partir do exame metalográfico da amostra, peça ou componente inspecionado, de modo a garantir cabalmente que os sinais / imagens obtidos correspondem exatamente aos defeitos/danos realmente existentes no material, tenham eles sido deliberadamente ou não introduzidos no mesmo.

REFERÊNCIAS

- [1] ASKELAND D.R. (1994) The science and engineering of materials. New York: PWS Publishing Company.
- [2] DOT/FAA/AR-02/110 (2003) U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aviation Research and Development, Guidelines for the development of process specifications, instructions, and controls for the fabrication of fiber-reinforced polymer composites, Final Report, Washington, D.C. 20591.
- [3] MALDAGUE X. (2001) Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing, John-Wiley & Sons, 684 p.
- [4] http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&ei=bFhgS5_JG9TY8Aamg_42bDA&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&ved=0CAYQBSgA&q=p ercentual+composites+usage&spel=1 - Acesso em Outubro de 2009.
- [5] <http://www.compositesworld.com/articles/boeing-sets-pace-for-composite-usage-in-large-civil-aircraft.aspx> - Acesso em Setembro de 2009.
- [6] RESENDE M.C., BOTELHO E.C. (2000) O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial, Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, n.2, p.E4-E10.
- [7] FIORELLI J. (2002) Utilização de fibras de carbono e de vidro para reforço de vigas de madeira, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 168p.
- [8] KAKIUCHI H., THOI H.H., QUANG T.V. (1981) [The synthesis of new epoxy resins and their physical properties](#), [The Journal of Adhesion](#), v.11, n.4 p.291- 304.
- [9] RUSHING R.A., THOMPSON C., CASSIDY P.E. (1994) Investigation of polyamine quinones as hydrophobic curatives for epoxy resins, Journal of Applied Polymer Science, v.53, p.1211-1219.
- [10] http://www.ides.com/generics/Epoxy/Epoxy_overview.htm - Acesso em Dezembro de 2009.

- [11] www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/.../0221074_07_cap_02.pdf - Acesso em Junho de 2009.
- [12] ALMEIDA E.G.R. (2010) Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 128p.
- [13] NIU M.C.Y. (1988) Airframe structural design, Conmilit Press Ltd., Wanchai, Hong Kong, 591p.
- [14] NIU M.C.Y. (1992) Composite airframe structures, Conmilit Press Ltd., Wanchai, Hong Kong, 611p.
- [15] RAY B.C., HASAN S.T., CLEGG D.W. (2007) Evaluation of defects in FRP composites by NDT techniques, Journal of Reinforced Plastics and Composites, v.26, p.1187-1192.
- [16] KNOELLER S.L. (2009) Polymer matrix composite manufacturing induced defects, The AMMTIAC Quarterly, Volume 5, Number 4, 10 p.
- [17] BEER F.C., COETZER M., FENDEIS D., COSTA SILVA A. (2004) Neutron radiography and other NDE tests of main rotor helicopter blades, Applied Radiation and Isotopes, v.61, n.4, p.609-616.
- [18] LAPLANTE G., MARBLE A.E., MACMILLAN B., LEE-SULLIVAN P., COLPITTS B.G., BALCOM B.J. (2005) Detection of water ingress in composite sandwich structures: a magnetic resonance approach, NDT & E International, v.38, n.6, p.501-507.
- [19] WORLEY D.C., LIAW P.K., BENSON R.S. (1996) [Microscopy and ultrasound as NDT technique for polymer composites](#), Nondestructive Evaluation and Material Properties, v.44, p.65-71.
- [20] SIM J.K., IM K.H., HSU D.K. (2006) [Inspecting carbon matrix composites with airborne/conventional ultrasound](#), Experimental Mechanics in Nano and Biotechnology, v.326-328, p.1789-1792.
- [21] GRIMBERG R., STEIGMANN R., LEITOIU S. (2008) [Ultrasound and eddy current data fusion for evaluation of carbon-epoxy composites](#)

- [delaminations](#), Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, v.19, p.349-355.
- [22] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3368> - Acesso em Junho de 2009.
- [23] SAFAEINILI A., LOBKIS O.I., CHIMENTI D.E. (1996) [Air-coupled ultrasound and leaky lamb waves in composites](#), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, v.15, p.1059-1066.
- [24] PETERS J., KOMMAREDDY V., LIU Z. (2003) Non-contact inspection of composites using air-coupled ultrasound, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, v.20, p.973-980.
- [25] HSU D.K., BARNARD D.J. (2006) [Inspecting composites with airborne ultrasound: Through thick and thin](#) laminates, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, v.820, p.991-998.
- [26] http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm. Acesso em Dezembro de 2009.
- [27] FREEMANTLE R.J., HANKINSON N., BROTHERHOOD C.J. (2005) Rapid phased array ultrasonic imaging of large area composite aerospace structures, [Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring](#), v.47, n.3, p.129-132.
- [28] CARNEVAL R.O., MOREIRA A.B, SOUZA C., RICHTER M.R., SANTOS J.J.M., SIMÕES H.R. (2007) Uso das técnicas de END: ultra-som (TOFD e Phased Array), radiografia, partículas magnéticas e ACFM na avaliação de juntas soldadas com trincas de fadiga, IV Conferencia Panamericana de END, Paper 27, Buenos Aires, 18p.
- [29] <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-2.html> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [30] BECKER G.L. (1985) [A brief look at the low-energy radiography of composite-materials](#), Materials Evaluation, v.43, p.596-601.
- [31] BUENO C., BARKER M.D., BARRY R.C. (1994) [High resolution digital radiography and 3D computed tomography of composite materials](#), Moving Forward with 50 Years of Leadership in Advanced Materials - 3^{9th} International SAMPE Symposium and Exhibition, v.39, p.766-778.

- [32] SOARES H.N. (2007) Monitoração por raios-X de trincas de fadiga em juntas rebitadas de um laminado híbrido fibra-metal, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 145p.
- [33] BALASKO M., VERES I., MOLNAR G. (2004) [Composite structure of helicopter rotor blades studied by neutron- and X-ray radiography](#), Physica B-Condensed Matter, v.350, p.107-109.
- [34] BURKLE W.S., LEMLE L.P. (1993) [The effect of order-of-film placement in composite film radiography](#), Materials Evaluation, v.51, p.327-329.
- [35] <http://www.prorad.com.br/downloads/imag-4.pdf> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [36] <http://www.ge-mcs.com/en/radiography-x-ray.html> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [37] IBARRA-CASTANEDO C. (2005) Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase, PhD Thesis, Laval University, Canada, 121p.
- [38] en.wikipedia.org/wiki/Planck's_law - Acesso em Janeiro de 2010.
- [39] <http://cref.if.ufrgs.br/~leila/cor.htm> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [40] http://www.infraredoftheupstate.com/Infrared_Thermography.htm - Acesso em Agosto de 2009.
- [41] AVDELIDIS N.P., ALMOND D.P., DOBBINSON A., HAWTIN B.C., IBARRA-CASTANEDO C., MALDAGUE X. (2004) Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT, Progress in Aerospace Sciences, v.40, p.143-162.
- [42] OCÁRIZ I.S., ALONSO F., GAMBÍN B. (2005) Termografía infrarroja como ensayo no destructivo: detección de defectos en componentes aerospaciales, <http://www.interempresas.net/metalmecanica/articulos/Articulo.asp?A=11149>, Centro de Tecnologías Aeronáuticas (CTA-Espanã).

- [43] RIEGERT G., PFLEIDERER K., GERHARD H., SOLODOV I., BUSSE G. (2006) Modern methods of NDT for inspection of aerospace structures, European Congress on Non-Destructive Testing, We.4.1.4.
- [44] SWIDERSKI W., SZABRA D., WOJCIK J. (2002) Nondestructive evaluation of aircraft components by thermography using different heat sources, Quantitative Infrared Thermography, v.6, p.79-84.
- [45] RIEGERT G., GLEITER A., GERHARD H., BUSSE G. (2007) Active thermography for defect detection in carbon fiber reinforced composite materials, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, v.26, p.1044-1051.
- [46] SANTULLI C. (2004) Impact damage characterization of thermoplastic matrix composites using transmission transient thermography, Nondestructive Testing and Evaluation, v.19, n.3, p.79-90.
- [47] <http://thermalwave.com/tsr.php> - Acesso em Janeiro de 2009.
- [48] www.techalone.com/wp-content/uploads/2009/08/THERMOGRAPHY.ppt - Acesso em Outubro de 2009.
- [49] BATES D., SMITH G., LU D., HEWITT J. (2000) Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components, Composites: Part B, v.31, p.175-185.
- [50] SHEPARD S.M., LHOTA J.R., AHMED T., HOU Y.L. (2003) Thermographic inspection of composite structures, SAMPE Journal, v.39, n.5, p.232-239.
- [51] MARSH G. (2007) NDT - checking the quality of the quality checker, Reinforced Plastics, February, p.16-21.
- [52] SHEPARD S.M., LHOTA J.R., AHMED T., HOU Y.L. (2003) Thermographic inspection of composite structures, SAMPE Journal, v.39, n.5, p.232-239.
- [53] <http://www.visioimage.com/en/> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [54] SHEPARD S.M. (2007) Thermography of composites, Materials Evaluation, July, p.690-697.

- [55] KRUPKA R. (2001) [Laser-shearography for non-destructive testing of large-area composite helicopter structures](#), Insight, v.43, p.244-248.
- [56] KRUPKA R., BURGGRAF H., RATHJEN D. (1999) [Nondestructive large area composite testing using shearography](#), Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, v.3824, p.245-254.
- [57] CHOI S.W., LEE J.H. (2004) [Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography](#), Advances in Nondestructive Evaluation, v.270-273, p.781-786.
- [58] ERNE O., WALZ T., ETTEMEYER A. (2000) Composite structural integrity NDT with automatic shearography, Materials Evaluation, v.58, p.1378-1382.
- [59] GERALDES S.M.M. (2008) Desenvolvimento e construção dum sistema interferométrico *shear* baseado da *shearography speckle* para medição de deformações no plano, Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 144p.
- [60] GREGORY R. (2003) Composite repair inspection by laser shearography, Insight, v.45, p.183-185.
- [61] HUNG Y.Y. (1999) [Applications of digital shearography for testing of composite structures](#), Composites Part B-Engineering, v.30, p.765-773.
- [62] TOH S.L., CHAU F.S., SHIM V.P.W. (1990) [Application of shearography in nondestructive testing of composite plates](#), Journal of Materials Processing Technology, v.23, p.267-275.
- [63] <http://www.dantecdynamics.com/> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [64] TARPANI J.R. (2006) Fadiga após múltiplos impactos em laminados carbono-epóxi, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABMM), v.2, p.63-70.
- [65] <http://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction> - Acesso em Dezembro de 2009.
- [66] [ASTM E 2582 -07](#) Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications1