

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**MARCO HENRIQUE FERREIRA**

**Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a  
materiais compósitos estruturais**

**São Carlos**  
**2023**



**MARCO HENRIQUE FERREIRA**

**Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a  
materiais compósitos estruturais**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador (a): Prof. Dr. José Ricardo Tarpani

Co-orientador (a): Prof. Dr. Henrique Coelho Fernandes

**São Carlos**

**2023**

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues  
Fontes da EESC/USP

F383c                      Ferreira, Marco Henrique  
                                 Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a materiais compósitos estruturais / Marco Henrique Ferreira; orientador José Ricardo Tarpani; coorientador Henrique Coelho Fernandes. -- São Carlos, 2023.

                                 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, caracterização e Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

                                 1. Compósitos laminados. 2. Choques térmicos.  
3. Impacto. 4. Inspeção não destrutiva. I. Título.

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Tecnólogo **MARCO HENRIQUE FERREIRA.**

Título da dissertação: "Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a materiais compósitos estruturais".

Data da defesa: 24/10/2023.

### **Comissão Julgadora**

### **Resultado**

Prof. Associado **José Ricardo Tarpani**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Marcelo Leite Ribeiro**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Demétrio Jackson dos Santos**  
(Universidade Federal do ABC/UFABC)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais:

Prof. Associado **Rafael Salomão**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, Josué e Zelinda, que muitas vezes se doaram e renunciaram seus sonhos, para que eu pudesse realizar os meus. Quero dizer que essa conquista não é só minha, mas nossa. Tudo que consegui só foi possível graças ao amor, apoio e dedicação que vocês sempre tiveram por mim. Sempre me ensinaram a agir com respeito, simplicidade, dignidade, honestidade e amor ao próximo. E graças à união de todos, os obstáculos foram ultrapassados, vitórias foram conquistadas e alegrias divididas.*

*À minha esposa e melhor amiga, Jéssica Roberta Costa Ferreira, pelo imenso companheirismo de todas as horas, e pelo meu Filho Luigi Henrique Ferreira.*

*Aos meus irmãos Márcio e Joel, pela amizade, carinho e companheirismo de sempre e por estarem sempre torcendo pelas minhas conquistas. Pelo apoio e incentivo incondicional.*



## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço primeiramente à Deus, por me iluminar todos os dias e me permitir chegar até aqui, apesar de todas as dificuldades enfrentadas em conciliar estudo, tese, trabalho e família.*

*À minha esposa Jéssica, que me apoiou todos esses anos, em todos os momentos e em todas as coisas que já fiz na vida. E que mesmo que quando as coisas pareciam difíceis demais, nunca me deixou desistir dos meus sonhos e soube entender minhas ausências.*

*Ao meu filho Luigi, que é a razão de tudo o que eu faço e minha motivação de cada dia para tentar ser uma pessoa melhor.*

*À minha família, que sempre me mostrou a importância do estudo e do trabalho duro, através de valores que sempre levarei comigo.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. José Ricardo Tarpani, por ter acreditado em mim e me aceitado como orientando, por todos os ensinamentos compartilhados, me ajudando com prontidão, dedicação e paciência. Sem ele, esse trabalho não seria possível.*

*Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Henrique Coelho Fernandes pela enorme contribuição de seu conhecimento para a realização deste trabalho.*

*A todos os professores do SMM e externos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.*

*À empresa Fundação Moreno por acreditar no meu potencial e disponibilizar as viagens para São Carlos.*

*Ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da USP- São Carlos pela oportunidade de realização do curso de Mestrado, pela infraestrutura e formação acadêmica.*

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.*

*Muito obrigado a todos!*





*“Se um homem tem um talento e não tem capacidade de usá-lo, ele fracassou. Se ele tem um talento e usa somente a metade deste, ele fracassou parcialmente. Se ele tem um talento e de certa forma aprende a usá-lo em sua totalidade, ele triunfou gloriosamente e obteve uma satisfação e um triunfo que poucos homens conhecerão.”*

*(Thomas Wolfe)*



## RESUMO

FERREIRA, M. H. **Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a materiais compósitos estruturais**, 109 p. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Materiais avançados, como laminados compósitos de matriz termoplástica, são amplamente utilizados nas indústrias aeronáutica, militar e civil, devido às suas excelentes propriedades mecânicas específicas. Os ensaios não destrutivos são essenciais para garantir a qualidade e integridade dos materiais compósitos durante a fabricação e uso. É importante escolher o método mais adequado para cada tipo de aplicação, considerando as propriedades do material, o tipo de defeito a ser detectado e o custo-benefício do método escolhido. Com o uso dos ensaios não destrutivos, é possível identificar defeitos e prevenir falhas em materiais compósitos, garantindo a segurança e confiabilidade em suas aplicações. Neste trabalho, vários métodos foram utilizados para avaliar espécimes curvos previamente submetidos a choques térmicos e impactados balisticamente. Concluiu-se que a radiografia foi o método mais categórico na detecção de danos. A estereoscopia exibiu danos de fácil entendimento, porém, devido a necessidade de preparação da superfície a ser analisada, pequenos danos foram mascarados, mostrando resultados duvidosos para este método. A ultrassonografia mostrou-se ser um método bastante sensível na detecção de danos na região interna, mas necessita que a superfície do componente em análise esteja livre de irregularidades como, por exemplo, danos e rugosidades que atrapalham o perfeito acoplamento do transdutor à peça. A termografia foi o método mais rápido na indicação de danos, sendo uma valiosa alternativa para um mapeamento rápido em inspeções preliminares, seguidas de aplicação de técnicas complementares. Por fim, o método por correntes parasitas, indicou claramente os danos superficiais e subsuperficiais nos laminados compósitos curvos, mostrando-se ser um método de análise de danos com fácil interpretação devido ao contraste nos resultados, apesar de apresentar-se muito limitado para análise com maior espessura para laminados compósitos.

**Palavras-chave:** Compósitos laminados, choques térmicos, impacto, inspeção não destrutiva.



## ABSTRACT

FERREIRA, M. H. **Comparison between non-destructive inspection methods applied to structural composite materials**, 109 p. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Advanced materials such as thermoplastic matrix composite laminates are widely used in the military and civil aviation industries due to their excellent specific mechanical properties. Non-destructive testing is essential to ensure the quality and integrity of composite materials during manufacture and use. It is important to choose the most suitable method for each type of application, considering the properties of the material, the type of defect to be detected and the cost-effectiveness of the chosen method. With the use of non-destructive tests, it is possible to identify defects and prevent failures in composite materials, ensuring safety and reliability in their applications. In this work, several methods were used to evaluate curved specimens previously subjected to thermal shocks and ballistically impacted. It was concluded that radiography was the most categorical method for detecting damage. Stereoscopy showed damage that was easy to understand, but due to the need to prepare the surface to be analyzed, small damage was masked, showing dubious results for this method. Ultrasonography proved to be a very sensitive method for detecting damage in the internal region, however it requires that the surface of the component under analysis is free of irregularities such as damage and roughness that hinder the perfect coupling of the transducer to the part. Thermography was the fastest method for indicating damage, being a valuable alternative for rapid mapping in preliminary inspections followed by the application of complementary techniques. Finally, the eddy current method clearly indicated surface and subsurface damage in the curved composite laminates, proving to be a damage analysis method with easy interpretation due to the contrast of the results. Despite being very limited for analysis with greater thickness for composite laminates.

**Keywords:** Laminated composites, thermal shocks, impact, nondestructive inspection.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos materiais compósitos .....	27
Figura 2 – Comparação de várias propriedades entre laminados compósitos e ligas metálicas de alto desempenho, em que a eficiência estrutural de laminado é muito superior à das ligas .....	28
Figura 3 – Estrutura do mero do poli(sulfeto de fenileno). .....	31
Figura 4 – Diagrama tensão-deformação em carregamento de flexão para 3 laminados compósitos e uma liga metálica de aplicação aeronáutica .....	32
Figura 5 – Diagrama de resistência mecânica contra rigidez considerada a densidade dos diversos materiais na forma de fibras (adaptado 16,17).....	33
Figura 6 – Condição de tensão tratativa uniaxial (a) e biaxial (b) em laminados compósitos (b) .....	35
Figura 7 – Exemplo de nomenclatura da disposição de camadas em um laminado fibroso simétrico e quase-isotrópico .....	35
Figura 8 – Desenho ilustrativo do processo de moldagem por compressão a quente .....	36
Figura 9 – Etapas do processamento por moldagem por compressão a quente .....	37
Figura 10 – Utilização de materiais de construção na aeronave Boeing Dreamliner.....	38
Figura 11 – Satélites de comunicação DFH3 (a) e SMAP (b) .....	39
Figura 12 – Danos por choques térmicos repetitivos (fadiga térmica) de laminados compósitos poliméricos fibrosos .....	40
Figura 13 – Danos por impacto transversal (a) e translaminar (b) em laminados compósitos polímeros fibrosos .....	41
Figura 14 – Formas características de falha em estruturas impactadas. (a) laminado com maior espessura. (b) laminado com menor espessura. ....	42
Figura 15 – Representação da resposta e da falha na placa. (a) e (b) baixa velocidade de impacto. (c) alta velocidade de impacto. ....	45
Figura 16 – Tubo de raios-X ilustrando o processo de geração da radiação-x ionizante	56



Figura 17 – Esquematização da inspeção radiográfica por filmes (radiografia convencional ou analógica) .....	58
Figura 18 – Tubo de raios-X ilustrando o processo de geração da radiação ionizante ...	59
Figura 19 – Princípios básicos da inspeção de materiais por ultrassom.....	60
Figura 20 – Técnica pulso-eco.....	62
Figura 21 - Representação A-scan.....	62
Figura 22 – Representação B-scan. ....	63
Figura 23 – Representação C-scan .....	63
Figura 24 – Representação C-scan de uma peça com revestimento, as áreas amarelas mostram falta de aderência do revestimento no metal base .....	64
Figura 25 – Exemplo de imagem IRT utilizada no campo da medicina para estudos na descoberta de câncer.....	66
Figura 26 - Diferentes abordagens à TIV.....	67
Figura 27 – Análises temporal (a), e espacial (b) via método PCT.....	69
Figura 28 – Esquematização dos diferentes modos de aplicação da TIV .....	70
Figura 29 – Esquemático das correntes induzidas no material.....	71
Figura 30 – Princípio do ensaio por correntes parasitas: (a) campo magnético primário (b) correntes induzidas no material condutor (c) campo magnético secundário gerado na peça. ....	73
Figura 31 - Ensaio por correntes parasitas aplicado na fuselagem da aeronave.....	74
Figura 32 – Projeto elaborado dos corpos de prova .....	77
Figura 33 – Região de corte do corpo de prova .....	78
Figura 34 – Inspeção UT .....	79
Figura 35 – Configuração do PT (A – Câmera IR, B – Lâmpadas de flash, C – Amostra) .....	81
Figura 36 – Configuração de amostra e teste.....	81

Figura 37 – Imagem da configuração de teste.....	82
Figura 38– Descrição das principais atividades propostas neste trabalho.....	83
Figura 39 – Resultado por estereoscopia.....	85
Figura 40 – Análise na região da extremidade: resultado por radiografia (a esquerda) e resultado por estereoscopia (a direita).....	86
Figura 41 - Análise na região 1/4, 1/2 e 3/4 da largura: resultado por radiografia (a esquerda) e resultado por estereoscopia (a direita) .....	86
Figura 42 – Resultados por ultrassom com impacto: (a) corpo de prova virgem; (b) corpo de prova com 150 ciclos de choques térmicos; (c) corpo de prova com 300 ciclos de choques térmicos; (d) corpo de prova com 500 ciclos de choques térmicos.....	88
Figura 43 – Corpo de prova com histórico de 500 ciclos de choques térmicos: lado esquerdo (resultado ultrassônico) e lado direito (resultado por radiografia).....	89
Figura 44 – Resultados por termografia com impacto: (a) corpo de prova virgem; (b) corpo de prova com 150 ciclos de choques térmicos; (c) corpo de prova com 300 ciclos de choques térmicos; (d) corpo de prova com 500 ciclos de choques térmicos.....	90
Figura 45 – Vista superior do corpo de prova com danos lineares superficiais .....	90
Figura 46 – Corpo de prova com histórico de 500 ciclos de choques térmicos: lado esquerdo (resultado por termografia) e lado direito (resultado por radiografia). .....	91
Figura 47 – Resultados por correntes parasita com impacto: (a) corpo de prova virgem; (b) corpo de prova com 150 ciclos de choques térmicos; (c) corpo de prova com 300 ciclos de choques térmicos; (d) corpo de prova com 500 ciclos de choques térmicos .....	92
Figura 48 – Corpo de prova com histórico de 500 ciclos de choques térmicos: lado esquerdo (resultado por correntes parasitas) e lado direito (resultado por estereoscopia).....	93



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Principais propriedades mecânicas de fibras sintéticas de reforço .....	33
Tabela 2 – Classificação das técnicas de ensaios END de acordo com os princípios básicos que regem seu funcionamento .....	55
Tabela 3 – Principais vantagens e limitações da técnica por correntes parasitas.....	75
Tabela 4 – Condições de choque térmico e impacto para cada corpo de prova.....	77



## LISTA DE SIGLAS

SMAP - *Soil Moisture Active Passive*

NASA - National Aeronautics and Space Administration

PPS – Poli (sulfeto de fenileno)

LEO - *low-earth orbit*

END - Ensaios Não Destrutivos

Cr - Cromo

PEEK - Poli(éter-éter-cetona)

PEI - Poli(éter-imida)

Tg - Temperatura de Transição Vítrea

UV - Radiação ultravioleta

ASTM - American Society for Testing and Material

VS - Visual

LP - Líquido Penetrante

PM - Partículas Magnéticas

R - Radiografia

US - Ultrassom

TIV - Termografia Infravermelha

CP - Correntes Parasitas

LT - *lock-In Thermography*

PT - *Pulse Thermography*

SPT - *Square Pulse Thermography*

SHT - *Step Heating Thermography*

EOF - *Emissivity Optimization Factor*

HF - *High Frequency*

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*





## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
1.1 Considerações Iniciais .....	25
1.2 Objetivo .....	26
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	27
2.1 Compósitos Laminados Estruturais Reforçados Por Fibras Contínuas .....	27
2.1.1 Compósitos Fibrosos de Matriz Termoplástica .....	29
2.1.2 Matriz de polisulfeto de fenileno (PPS) .....	30
2.1.3 Reforço com Fibras de Carbono (FC) .....	31
2.1.4 Orientação de Fibras Contínuas.....	34
2.1.5 Moldagem por Compressão a Quente .....	36
2.2 Aplicação de Laminados Compósitos.....	37
2.3 Danos em Laminados Aeronáuticos .....	40
2.3.1 Impacto Transversal .....	41
2.3.1.1 Material e geometria .....	41
2.3.1.2 Massa do Projétil .....	43
2.3.1.3 Velocidade do projétil (Energia cinética e força de contato).....	44
2.3.1.4 Impacto em Laminados Curvos .....	46
2.3.2 Degradação Ambiental .....	47
2.3.2.1 Efeito da umidade .....	50
2.3.2.2 Efeito de Ciclos/Choques Térmicos .....	50
2.4 Danos por Impacto em Laminados Curvos Submetidos à Ciclagem/Choques Térmicos.....	53
2.5 Inspeção Não-Destrutiva.....	54
2.5.1 Radiografia .....	55
2.5.1.1 Fundamentos da Radiografia e Aplicações.....	55
2.5.1.2 Operacionalização da técnica radiográfica .....	57
2.5.1.3 Efeito da Orientação do Defeito/Dano e Outras Limitações .....	58
2.5.2 Ultrassom.....	60
2.5.2.1 Princípios básicos do método .....	60
2.5.2.2 Finalidade do Ensaio .....	61
2.5.2.3 Campo de aplicação.....	61
2.5.2.4 Técnicas de ensaio .....	61
2.5.2.5 Formas de representação .....	62
2.5.2.6 Vantagens .....	65

2.5.2.7	Limitações em relação a outros ensaios. ....	65
2.5.3	Termografia .....	65
2.5.3.1	Aplicações .....	66
2.5.3.2	Técnicas de ensaio .....	67
2.5.3.3	Vantagens.....	70
2.5.3.4	Desvantagens .....	70
2.5.4	Correntes parasitas .....	71
2.5.4.1	Fundamentos.....	71
2.5.4.2	Método.....	72
2.5.4.3	Funcionamento .....	72
2.5.4.4	Aplicações .....	73
2.5.4.5	Técnicas de ensaio .....	74
2.5.4.6	Vantagens e limitações .....	75
3.	MATERIAL, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS .....	76
3.1	Material.....	76
3.2	Métodos e Equipamentos.....	78
3.2.1	Estereoscopia .....	78
3.2.2	Radiografia .....	78
3.2.3	Ultrassom.....	78
3.2.4	Termografia.....	80
3.2.5	Correntes Parasitas .....	81
3.3	Fluxograma de Atividades .....	82
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	84
4.1	Considerações gerais.....	84
4.2	Estereoscopia .....	84
4.3	Radiografia.....	85
4.4	Ultrassom .....	87
4.5	Termografia .....	89
4.6	Correntes parasitas .....	91
5.	CONCLUSÃO .....	95
	REFERÊNCIAS .....	97





## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

Laminados compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de carbono, são amplamente utilizados nas indústrias espacial, aeronáutica, automobilística, eólica, dentre outras, devido, principalmente, às elevadas propriedades mecânicas específicas (por unidade de massa) e grande flexibilidade de projeto. Componentes de estruturas aeroespaciais, incluído satélites, empregam hoje laminados compósitos com fibras de carbono reforçando matrizes termoplásticas (ex., poli sulfeto de fenileno – PPS), que exibem vantagens sobre as tradicionais resinas termorrígidas (ex. epóxis), tais como, maior resistência e tolerância a danos; particularmente os decorrentes de impactos, maior facilidade de fabricação, tempo de armazenamento infinito, soldabilidade e reparabilidade [1].

Aeronaves comerciais de grande porte (ex., Airbus A380) já se utilizam do laminado compósito PPS na forma de geometrias complexas (curvas,) localizadas em bordos de ataque que experimentam os efeitos nefastos de impacto e de ação ambiental. Porém, em ambiente espacial LEO (*low-earth orbit*), tipicamente abaixo de 1000 km de altitude, cargas de impacto transversal por micrometeoritos, associadas a variações térmicas extremas (de -200°C até +150°C) não são infrequentes, e constituem circunstâncias muito mais críticas enfrentadas por satélites geoestacionários, sendo que tais condições, devem também ser avaliadas para fins de projeto mecânico e garantia de integridade estrutural [2].

Visando garantir a segurança, confiabilidade e vida operacional destes componentes/estruturas operando sob aquele regime contínuo, ensaios laboratoriais controlados de durabilidade, simulando condições reais ou que mais se aproximam observadas em serviço, devem ser realizados e idealmente devem contar com o auxílio de ensaios não-destrutivos, de modo a detectar e monitorar tanto a criação como a evolução de danos.

Os ensaios não-destrutivos (END) podem ser definidos como um conjunto de técnicas que possibilitam a análise e a caracterização de materiais, componentes e estruturas, sem que estas tenham sua integridade maculada em qualquer medida, não afetando sua utilidade e funcionalidade futura [3].

## 1.2 Objetivo

O intuito deste projeto é comparar o potencial de identificação, qualificação e quantificação de danos e defeitos gerados nas etapas de manufatura e durante serviço de elementos estruturais astronáutico laminados, confeccionados em material compósito de matriz polimérica termoplástica de PPS reforçada com fibras contínuas de carbono, utilizando-se de diferentes técnicas não destrutivas convencionais (ultrassom, radiografia e correntes parasitas) e avançadas (termografia). Para simular as condições de trabalho que mais se aproximam encontradas por veículos se deslocando na órbita baixa terrestre, os corpos de prova foram previamente submetidos a choques térmicos repetidos e, posteriormente, impacto balístico. Os resultados poderão ser úteis na concepção, manufatura, manutenção, reparo, qualificação e seleção de materiais compósitos de alto desempenho para aplicações críticas, além de auxiliar qual método de ensaio não-destrutivo é o mais apropriado para condição de cada projeto.

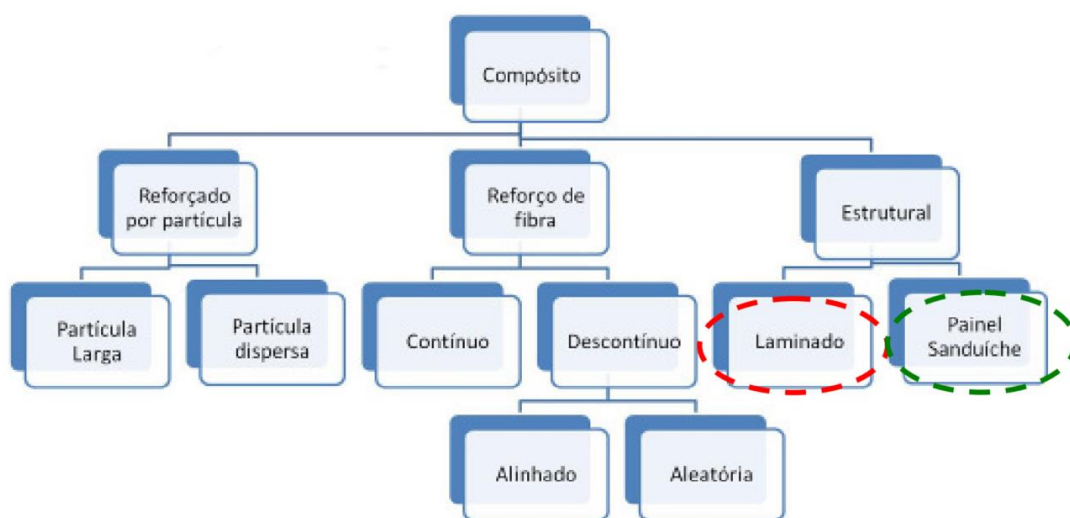
## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Compósitos Laminados Estruturais Reforçados Por Fibras Contínuas

Os materiais compósitos (ou composto), podem ser genericamente definidos como aqueles materiais manufaturados através da mistura física, racional ou volumétrica, de um ou mais materiais ou microestruturas, que diferem na forma, possuem interfaces definidas e insolúveis entre si [4].

Uma classificação muito aceita dos diversos tipos de materiais compósitos, é fornecida esquematicamente na Figura 1. Dentre estes diversos tipos de compósitos, destaca-se a classe dos laminados estruturais reforçados por fibras contínuas (elipse vermelha), de modo a diferenciá-los dos chamados painéis sanduíche, que apresentam núcleos celulares ou vazados (elipse verde), ambos empregados em estruturas de alto desempenho das indústrias aeronáutica, marítima, automotiva, petroquímica, de geração de energia eólica, dentre outras [4].

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos



Fonte: ASKELAND, 2004.

No século XX, as ligas metálicas foram dominantes em aplicações estruturais, oferecendo melhores propriedades quando comparadas com os metais puros. Por exemplo, o ferro fundido apresenta ser frágil e passível de corrosão, mas a adição de 1% de carbono, torna-o mais rígido e quando adicionado cromo (Cr) em quantidades

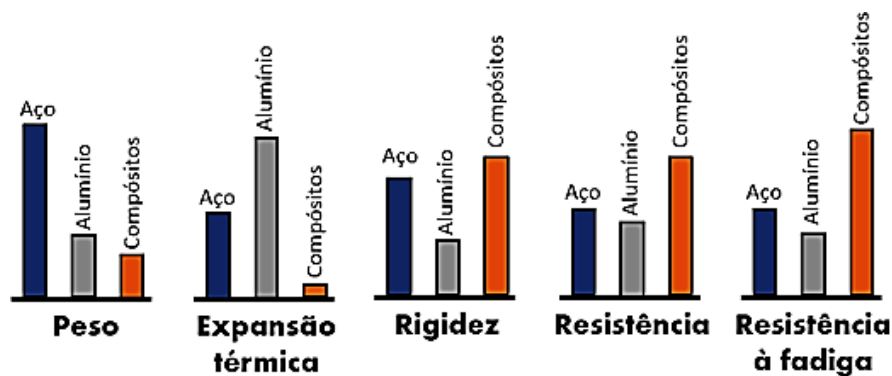
relevantes, apresenta grande resistência a corrosão [5].

O fato da resistência específica dos compósitos laminados estruturais ser três vezes superior às ligas de alumínio e duas vezes maior que a do aço de alta resistência, levou essas ligas à serem substituídas pelos compósitos. Estes, por sua vez, oferecem a rigidez do aço a um quinto do peso e, a rigidez do alumínio, a metade do peso. Adicionalmente, a substituição de componentes de aço por componentes compostos também resulta em uma economia em peso, compreendida entre 60 a 80% e 20 a 50%, substituindo peças de alumínio [6].

Isto significa que, em média, uma estrutura composta para a mesma rigidez, poderá apresentar metade do peso. Além da resistência estática, também oferecem uma boa resistência à fadiga, pois esta, é na ordem dos 90% da resistência estática para um compósito, ao invés dos 50% dos aços e 35% das ligas de alumínio [6].

A Figura 2, mostra as vantagens desta classe de materiais frente à duas ligas metálicas convencionais empregadas na indústria aeronáutica, em termos de propriedades físicas e mecânicas específicas, ou seja, propriedade/unidade de massa.

Figura 2 - Comparação de várias propriedades entre laminados compósitos e ligas metálicas de alto desempenho, em que a eficiência estrutural do laminado é muito superior à das ligas.



Fonte: adaptado de CHAWLA, 2012.

Devido ao fato de apresentarem elevada resistência e rigidez específica, além de propriedades elétricas, térmicas e tribológicas, os compósitos laminados estruturais reforçados por fibras contínuas, revelam-se ideais para aplicações estruturais de baixo peso, além de se destacarem por [7]:

- O calor e a humidade não provocam o envelhecimento do material;
- Elevada resistência à corrosão (exceto no caso do alumínio com fibras de carbono em que ocorre corrosão galvânica);



- Não são sensíveis a produtos químicos comuns (óleos, petróleo, tintas e solventes (nota-se que os diluentes de tinta atacam as resinas epóxi);
- Possuem uma excelente resistência ao fogo, porém, os fumos emitidos pela combustão de certas matrizes, podem ser tóxicos;
- Materiais compósitos permitem integrar vários componentes metálicos num único componente compósito;
- Peças com geometrias complexas (por vezes não alcançáveis com metais, podem ser fabricados com compósitos);
- Estruturas compósitas permitem o monitoramento em serviço, com ajuda de sensores incorporados;
- As características de ruído, dureza e vibração são melhores em materiais compósitos, quando comparados em metais;
- Custo das ferramentas necessárias para manufatura e processamento de compósitos é muito menor do que o processamento de metais, devido aos menores requisitos de pressão e temperatura.

### **2.1.1 Compósitos Fibrosos de Matriz Termoplástica**

A fase matriz desempenha funções vitais, tais como: manter as fibras unidas e corretamente orientadas; protegê-las do ambiente e de contatos mecânicos, de modo a evitar sua degradação físico-químico-fotônica e/ou desgastá-las por abrasão e/ou danificá-las por impacto. Elas também têm a função de transferir a carga aplicada às fibras e distribuí-las fibra à fibra, prover ductilidade ao compósito, suportar as fibras de efeitos de flambagem, e definir as propriedades térmicas e elétricas do material como um todo. A escolha do tipo de matriz influencia, além das propriedades finais de um compósito, também o processo de fabricação do mesmo. As matrizes mais usadas são as poliméricas, em função da baixa densidade, relativamente fácil processamento, além de relativamente baixo custo [8].

Para aplicações aeroespaciais e espacial, as matrizes poliméricas mais utilizadas são as termorrígidas. Os polímeros termorrígidos passam pelo processo de cura quando da utilização de um catalisador. Isto ocorre, pelo fato desses polímeros apresentarem estrutura em rede, exibindo ligações cruzadas covalentes entre as cadeias adjacentes, que impedem a vibração e rotação de segmentos da macromolécula em temperaturas

mais elevadas, e por este motivo, estes materiais não amolecem quando aquecidos, ocorrendo assim a degradação do polímero. [9].

Entretanto, as matrizes termoplásticas amolecem com o aumento de temperatura e endurecem quando resfriadas, podendo este processo ser repetido inúmeras vezes. Porém, sabe-se que a exposição térmica a temperaturas mais elevadas, pode levar a degradação das propriedades do polímero. Em um nível molecular, o processo de amolecimento se explica pelo fato da cadeia principal desse polímero ser, em sua maioria linear. Deste modo, à medida que a temperatura aumenta, a força das ligações secundárias diminui, permitindo o amolecimento do polímero [10].

Quando comparado aos polímeros termorrígidos, os termoplásticos de engenharia apresentam dureza menor, mas geralmente, apresentam maior resistência ao impacto, menor absorção de água, maior temperatura de serviço (-60°C a 200°C), menor custo de transporte e estocagem (não necessitam de refrigeração), maior facilidade de execução de ensaios e possibilidade de reciclagem, além de poderem ser soldados [11,12].

Os fatores que, de certo modo, impedem um maior avanço no desenvolvimento de novas peças utilizando polímeros termoplásticos, geralmente estão relacionados à utilização de elevadas temperaturas de processamento (aproximadamente entre 300°C e 400°C), a falta de conhecimento dos mecanismos de deformação e a falta de processos de conformação com custos competitivos. Os processos mais utilizados para a manufatura deste material estrutural atualmente são: conformação por diafragma duplo; autoclave; deposição de fibra (*fiber placement*); conformação a vácuo e moldagem por compressão a quente [11,12].

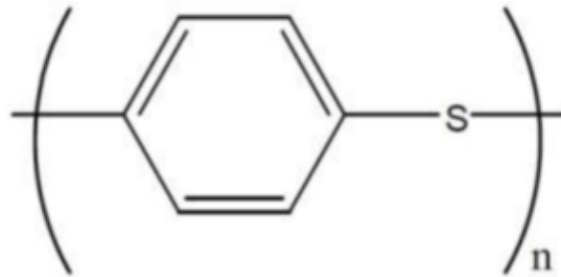
Atualmente, as matrizes termoplásticas mais utilizadas em compósitos estruturais com aplicação aeroespacial e espacial são: poliamidas; poliimidas, PEEK (poli(éter-éter-cetona)); PEI (poli(éter-imida)) e PPS (poli(sulfeto de fenileno)) [13].

### **2.1.2 Matriz de polisulfeto de fenileno (PPS)**

O poli(sulfeto de fenileno) é um polímero termoplástico e semicristalino de alto desempenho, formado por anéis alternados para-substituídos de fenileno e átomos de enxofre, como apresentado na Figura 3. Dentre as principais características associadas a este polímero, destacam-se: elevada rigidez, elevada resistência à fadiga, elevado módulo de elasticidade específico, elevada resistência a fluência (até em temperaturas elevadas),

alto desempenho em temperaturas criogênicas, resistência química e a chama, fácil processabilidade e, devido à sua baixa viscosidade, esse polímero pode utilizar elevados teores de reforço [14,15].

Figura 3 - Estrutura do mero do poli(sulfeto de fenileno).



Fonte: GARDNER, 2008.

Com base na literatura científica, o PPS apresenta temperaturas de transição vítrea a 90°C, de fusão a 285°C e de início de degradação de aproximadamente 420°C [16].

O poli(sulfeto de fenileno) pode ser processado em forma de filme, injeção e como fibras ou *pellets*. Materiais compósitos que utilizam o PPS como matriz, são empregados principalmente nos setores químico e eletrônico. Quando reforçados com fibras contínuas de carbono, o compósito resultante é empregado em aplicações estruturais muito utilizado na indústria aeroespacial [17].

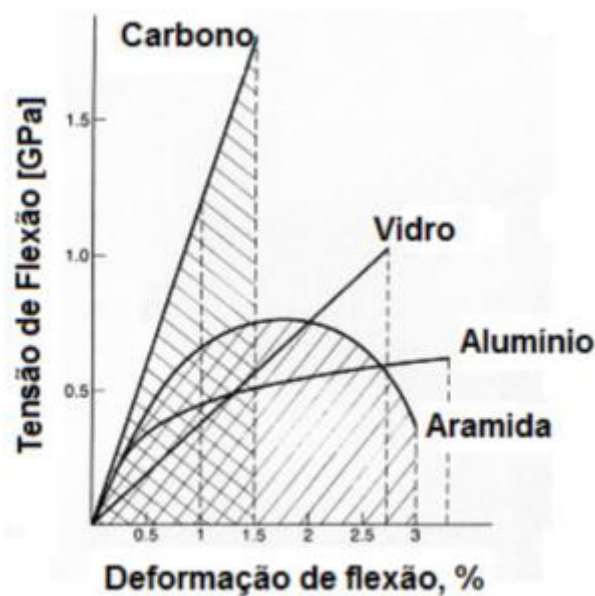
### 2.1.3 Reforço com Fibras de Carbono (FC)

A fase de reforço dos compósitos determina, essencialmente, a resistência mecânica e a rigidez desta classe de materiais. A intensidade dos incrementos nestas propriedades nos laminados fortalecidos com fibras contínuas, é uma função do tipo de fibra, orientação das mesmas, e sua concentração no compósito [18].

Como reforços estruturais, fibras de carbono, de vidro, de aramida, e de boro são as mais empregadas, com diâmetros entre 5 a 100  $\mu\text{m}$ , podendo combinações entre as mesmas, serem amplamente utilizadas, de modo a se manufaturarem compósitos exibindo propriedades híbridas, como por exemplo, carbono para elevada resistência mecânica e aramida para resistência ao impacto.

A Figura 4, apresenta um diagrama de tensão-deformação em que são plotadas curvas típicas de resistência à flexão de laminados compósitos, unidirecionais com fibras sintéticas contínuas de respectivamente: carbono, vidro e aramida, impregnadas com resina termorrígida epóxi. Para fins de comparação, é fornecida uma curva de flexão de uma liga de alumínio de grau aeronáutico. É possível evidenciar a rigidez e a resistência provida pelas fibras de carbono. Em contrapartida, ao comportamento mais flexível provido pelas fibras de aramida, enquanto as fibras de vidro garantem ao compósito um comportamento algo intermediário aos dois primeiros [19].

Figura 4 - Diagrama tensão-deformação em carregamento de flexão para 3 laminados compósitos e uma liga metálica de aplicação aeronáutica.



Fonte: NIU, 2008.

A Tabela 1, faz uma análise comparativa destas três classes de fibras com as fibras de carbono, sendo apresentadas em três diferentes categorias, entre as principais propriedades mecânicas, por unidade de volume.

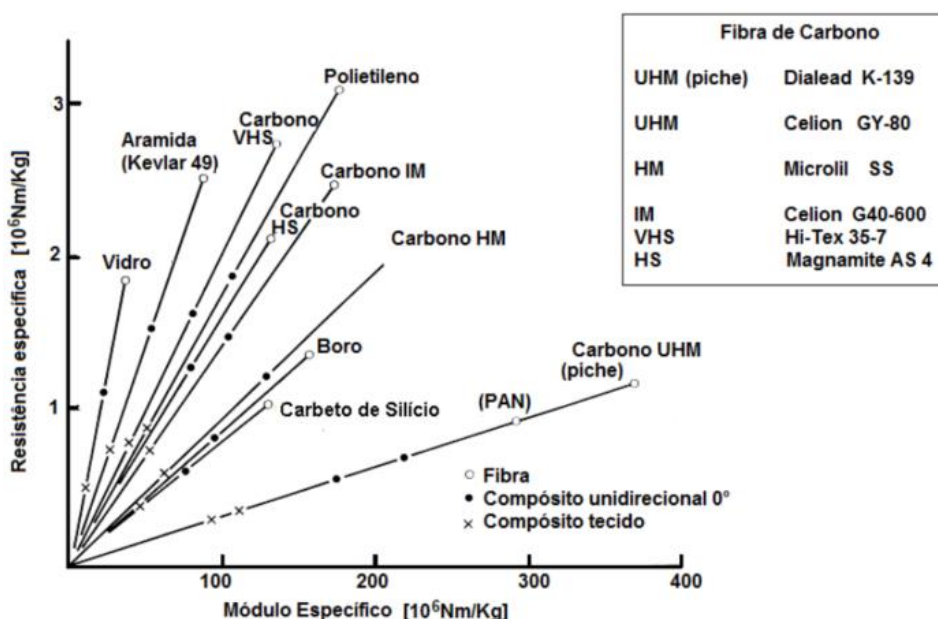
Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas de fibras sintéticas de reforço.

Tipo de Fibra	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)	Densidade Específica
Carbono de alta resistência	4300-4900	230-240	1,9-2,1	1,8
Carbono de alto módulo	2740-5490	294-329	0,7-1,9	1,76-1,81
Carbono de alta resistência e alto módulo	2600-4020	540-640	0,4-0,8	1,91-2,12
Aramida de alta resistência e alto módulo	3200-3600	124-130	2,4	1,44
Vidro	2400-3500	70-85	3,5-4,7	2,6

Fonte: NIU, 2012.

A figura 5 mostra de forma gráfica, os valores de resistência mecânica plotados, contra a rigidez (módulo de elasticidade), em carregamento sob tração, para uma variada gama de fibras de reforço considerando o desempenho específico dos materiais, ou seja, por unidade de massa (razão propriedade / densidade) [20,21].

Figura 5 - Diagrama de resistência mecânica contra rigidez considerada a densidade dos diversos materiais na forma de fibras.



Fonte: NIU, 2012.

É possível notar que, quando a densidade relativamente elevada da fibra de carbono é considerada (propriedade específica), a fibra de aramida e a fibra de polietileno de ultra-alto peso molecular, tornam-se candidatos de respeito para aplicações de alto desempenho mecânico.

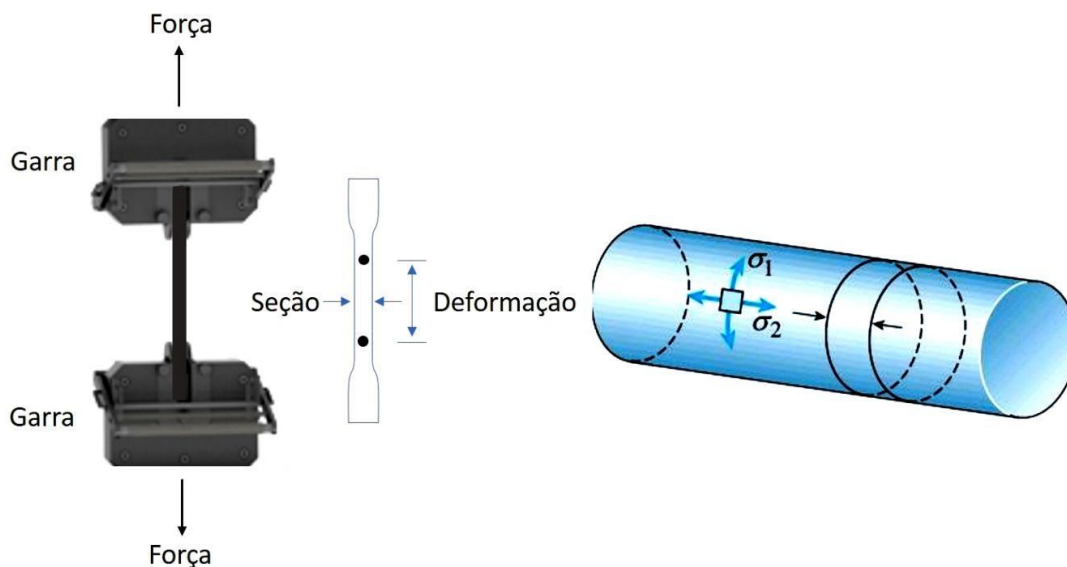
Observa-se também, da figura, que a condição máxima de desempenho é alcançada quando uma única fibra é ensaiada, no caso de as fibras estarem arranjas em tecido. Os pontos de contato entre as fibras orientadas ortogonalmente entre si, agem como locais de concentração de tensão, induzindo a fratura nesta região. Também, o fato de as fibras não poderem se alinhar perfeitamente na direção do carregamento, dada o trancamento dos filamentos, impede as fibras de desenvolverem seu máximo potencial em termos de resistência mecânica e rigidez [20,22].

#### **2.1.4 Orientação de Fibras Contínuas**

Seguindo com a ideia do ultimo paragrafo, laminados compósitos estruturais reforçados com fibras contínuas, apresentam como grande vantagem sobre os materiais monolíticos convencionais (tipicamente ligas metálicas), a possibilidade de dispor as fibras (fornecidas na forma de tapes unidirecionais ou tecidos bidirecionais) em determinada(s) orientação(ões), visando-se satisfazer a(s) direção(ões) principal(is) de carregamento mecânico, à(s) qual(is) será(ão) imposta(s) durante a vida em serviço do componente ou estrutural final [23,24].

Como exemplo, toma-se o caso de um componente solicitado puramente em tração (Fig.6a), o que não é, em absoluto uma condição usual em engenharia estrutural, mas serve como um exemplo ilustrativo. Em seu projeto, a disposição das camadas contendo fibras, há de favorecer o alinhamento das mesmas no sentido do carregamento trativo, ou seja, fibras paralelas a direção de aplicação do esforço mecânico, seja este imposto em carregamento cíclico (fadiga), ou, contrariamente, em solicitação quase-estática. Como referido, esta condição não é usual, visto que em estruturas reais há uma configuração mais complexa de carregamento. Como exemplo, cita-se uma fuselagem aeronáutica (Fig.6b) em que um estado biaxial de tensões trativas, se desenvolve devido à pressurização interna, na forma de esforços circunferencial e longitudinal [21,24].

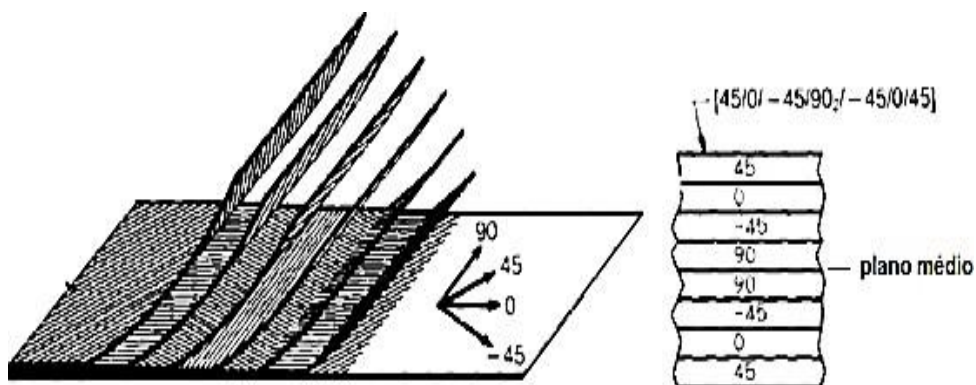
Figura 6 - Condição de tensão trativa uniaxial (a), e biaxial em laminados compósitos (b).



Fonte: HINTON, 2008.

Para ilustrar as direções das fibras em um compósito laminado, é utilizada uma nomenclatura especial, tal como descrita na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de nomenclatura da disposição de camadas em um laminado fibroso simétrico e quase-isotrópico.



Fonte: SIQUEIRA, 2009.

Nota-se, que os ângulos direcionais das camadas de fibras mostradas são apresentados entre colchetes, iniciando-se pela camada externa superior até a camada externa interior.

Portanto, é comum em um projeto de qualquer componente fabricado em material

compósito estrutural, o projetista calcular o número de camadas de fibras e qual a orientação que cada uma deve apresentar dentro do laminado, para que este apresente a resistência necessária frente ao sistema de carregamento a ser imposto durante sua operação em serviço. No caso em questão buscou-se uma resistência mecânica e rigidez bem distribuídas no plano do laminado.

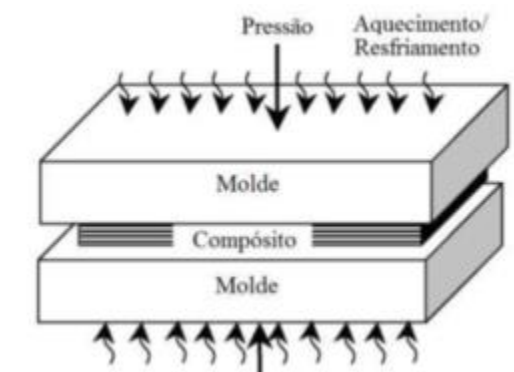
Atualmente, ferramentas computacionais com base no método dos elementos finitos, combinados com critérios de falha, auxiliam nas etapas de projeto de peças, componentes e estruturas fabricadas em laminados compósitos.

Dado que as fibras exibem máximo desempenho ao longo de seu comprimento, uma importante característica dos materiais compósitos fibrosos, é que o projetista tem a possibilidade de orientar suas camadas individuais que formam o laminado, de modo a adequar a estrutura compósita aos reforços principais aplicados à mesma em serviço, otimizando seu desempenho mecânico e reduzindo consideravelmente o peso estrutural.

### 2.1.5 Moldagem por Compressão a Quente

O processo mais utilizado atualmente para a obtenção de compósitos termoplásticos estruturais, consiste na impregnação por moldagem por compressão a quente. Este processo, consiste em empilhar camadas alternadas de matriz e reforço em um molde com a geometria desejada, e elevar a temperatura acima do ponto de fusão da matriz termoplástica, mantendo-se uma pressão controlada durante este processo, como mostrado na Figura 8. Estas condições propiciam um íntimo contato entre as camadas do material compósito, possibilitando a difusão da matriz polimérica entre as camadas individuais [25,26].

Figura 8 - Desenho ilustrativo do processo de moldagem por compressão a quente.



Fonte: Sonmez, 2010.



O processamento do material compósito, a partir da moldagem por compressão a quente, apresenta três etapas principais, sendo estas: a fusão da matriz termoplástica; a consolidação do compósito; e seu resfriamento, como apresentado na Figura 9. Na primeira etapa, o polímero é fundido/amolecido para que possa ser impregnado ao reforço. Durante a consolidação (segunda etapa), a temperatura e pressão auxiliam na percolação da matriz polimérica nas camadas de reforço. Nessa fase, o ar aprisionado é removido do interior do compósito. Na terceira e última fase deste processamento, o compósito é resfriado até uma temperatura abaixo da transição vítrea ( $T_g$ ) e, posteriormente, é desmoldado, finalizando o processo [26,27].

Figura 9 - Etapas do processamento por moldagem por compressão a quente.



Fonte: Bourban, 2001.

## 2.2 Aplicação de Laminados Compósitos

O uso de laminados compósitos tem-se ampliado e desenvolvido cada vez mais nas diversas áreas industriais. Nos segmentos aeroespacial (Figura 10) e astronáutico (Figs 11a e 11b) isso não é diferente, em virtude de suas características já enfatizadas, como leveza combinada com resistência mecânica, rigidez e flexibilidade do projeto. Desta forma, os compósitos de matriz polimérica, vêm substituindo aços e ligas metálicas de alumínio e titânio. A partir de sua utilização, estima-se uma redução de até 50% do peso, cerca de 80% em volume, e 25% de redução do custo final das peças, componentes e estruturas de aeronaves como o B787 e A350 [28].

Outras características relevantes para a indústria aeroespacial exibidas por esses

materiais, incluem resistência à fadiga e corrosão, possibilidade de ajuste da resistência mecânica e rigidez direcionais, capacidade de se moldar em formas grandes e complexas em um único ciclo de operação (*near-net-shape*), impactando na quantidade de peças e no tempo de montagem [29,30].

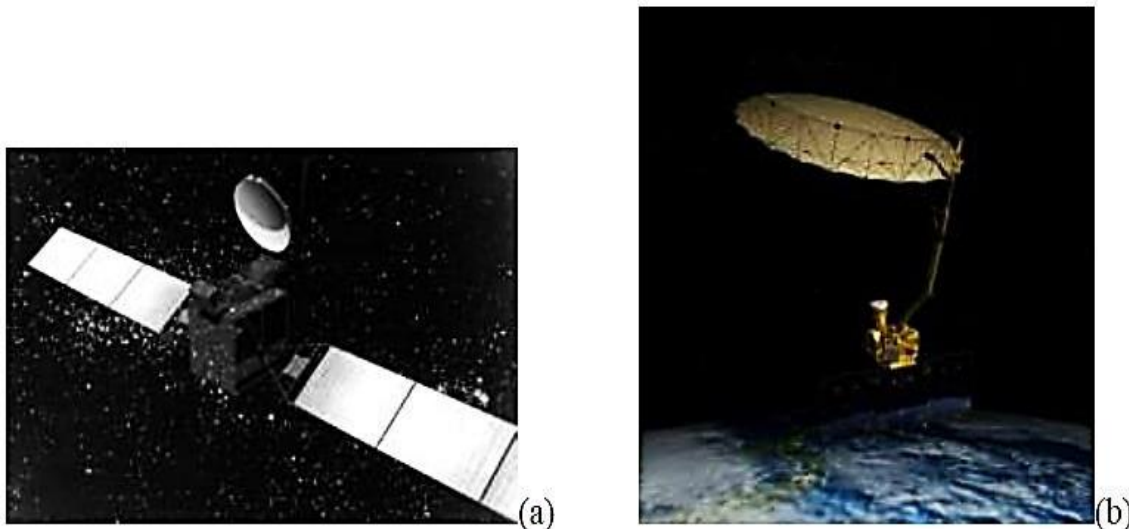
Figura 10 - Utilização de materiais de construção na aeronave Boeing Dreamliner.



Fonte: KESARWANI, 2017.

Tratando-se de estruturas astronáuticas, pode-se destacar o satélite de comunicação DFH3 (Fig.11a), que possui uma estrutura geometricamente complexa de fibra de carbono imersa em matriz de resina epóxi, e o recentemente lançado satélite da NASA SMAP - *Soil Moisture Active Passive* (Fig.11b), que possui toda a estrutura da antena em dome confeccionada em laminado compósitos termoplástico PPS [30,31].

Figura 11 - Satélites de comunicação DFH3 (a), e SMAP (b).



Fonte: Bansemir, 2016.

O SMAP é um satélite geostacionário com 944 Kg, que trafega à uma altitude de 685 km, e emprega uma antena parabólica refletora rotativa com 6m de diâmetro, confeccionada com compósito de matriz termoplástica PPS, reforçada com fibras contínuas de carbono. Temperaturas criogênicas (abaixo de  $-150^{\circ}\text{C}$ ), são alcançadas na sua superfície, quando não há ação direta de raios solares sobre a estrutura em movimento. Por outro lado, quando há ação direta do sol, implica em temperaturas acima de  $+100^{\circ}\text{C}$ . Assim, o equipamento experimenta um choque térmico extremo (considerando a presença de uma matriz polimérica) e de maneira repetida (1 ciclo térmico completo a cada 24 h), que se estende indefinidamente. Isso, associado à possibilidade de impactos por corpos vagando no espaço, constitui uma grande ameaça à integridade destes veículos espaciais [30,31].

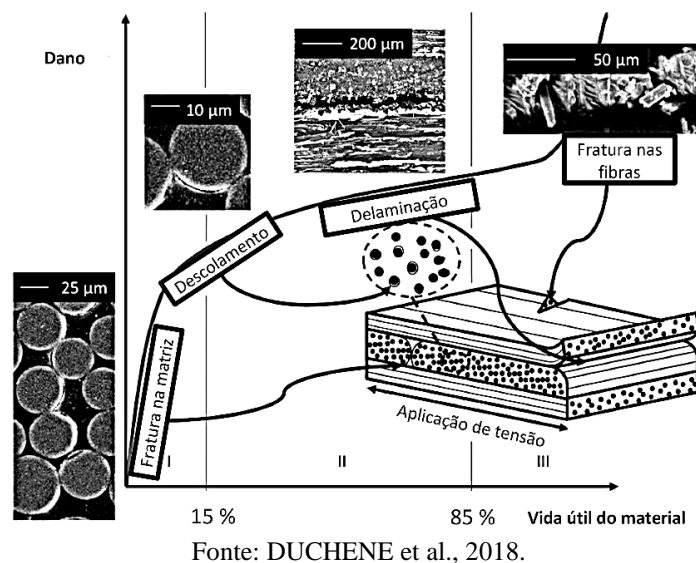
Conclui-se, portanto, que a caracterização por ensaios não destrutivos de danos originados por impacto balístico, aplicado à laminados de matriz polimérica termoplástica reforçada com fibras de carbono, conformados em geometrias curvas complexas e submetidos a ciclos térmicos extremos, constitui em tema atual e relevante de pesquisa científica e tecnológica. Eventualmente, até mesmo de inovação, no contexto dos materiais estruturais de engenharia, processos de manufatura, caracterização físico-mecânica, e inspeção não destrutiva de danos e defeitos.

### 2.3 Danos em Laminados Aeronáuticos

Impactos são frequentemente observados em estruturas aeroespaciais e astronáuticas, as quais estão sujeitas a colisão de objetos, desde granizo e pássaros em aeronaves, até micrometeoritos (poeira cósmica) e detritos de maior porte em espaçonaves e satélites que se deslocam e orbitam a Terra. Estatisticamente, os micrometeoróides são, de longe, os mais perniciosos em função de sua elevadíssima quantidade, aliada à velocidade hipersônica com que se deslocam no espaço (estimada em 10 km/s), o que, a despeito das massas muito pequenas destas partículas, representa uma quantidade de energia cinética considerável (da ordem de dezenas de Joules). Levando potencialmente, a danos por impacto e, aliado aos ciclos térmicos extremos que degradam a estrutura do compósito de matriz polimérica, constituindo graves problemas de integridade estrutural do veículo, merecendo ser considerado [32,33].

Quando os laminados compósitos são submetidos a variações bruscas de temperatura, tensões entre as fibras e a matriz podem ser geradas (tensão de cisalhamento) devido à diferença de coeficiente de expansão térmica entre as duas fases, ocasionando delaminações, descolamento entre fibras e matriz, fratura de fibra e microtrincas na matriz como ilustrado na Figura 11, reduzindo a vida útil do material e, conseqüentemente, da estrutura em operação [34,35].

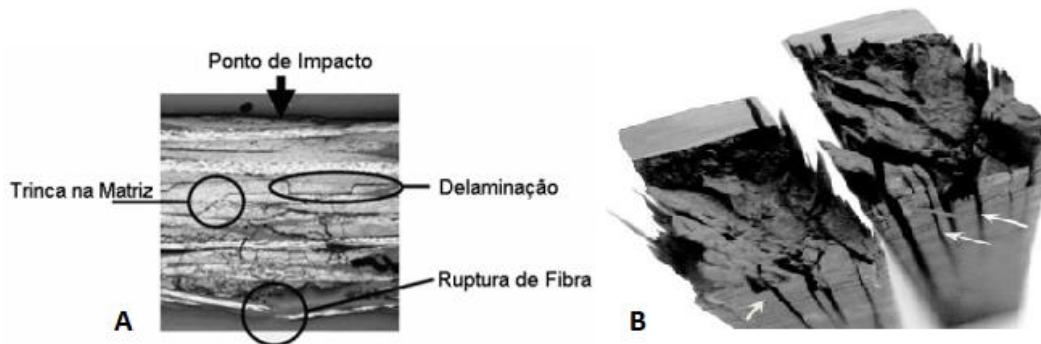
Figura 12 - Danos por choque térmicos repetitivos (fadiga térmica) de laminados compósitos poliméricos fibrosos.



Cargas de impacto levam a danos de mesma natureza, destacando-se, a falha por

delaminação, seja no caso de impactos transversais (Figura 13a) ou translaminares (Figura 13b).

Figura 13 - Danos por impacto transversal (a), e translaminar (b) em laminados compósitos poliméricos fibrosos.



Fontes: (a) MITREVSKI *et al.*, 2006, (b) TARPANI *et al.*, 2006.

### 2.3.1 Impacto Transversal

Cargas de impacto podem induzir a uma reação global ou local da estrutura. Reações globais podem se referir ao caso de uma ferramenta caindo de uma altura de um metro acidentalmente sobre uma estrutura. Já impacto com uma reação local, pode ocorrer em aeronaves, quando um pedaço de uma peça ou algo de pequena geometria que esteja na pista, é arremessado pela roda do trem de pouso contra sua estrutura durante a decolagem ou pouso [36].

Mesmo com uma extensiva revisão da literatura sobre a resposta de impactos em laminados compósitos, ainda é possível encontrar muitos questionamentos sobre o assunto. Pesquisadores estudam quais são os parâmetros mais críticos que precisam ser conhecidos para prever a danificação e avaliar a resposta do laminado sob impacto. Os parâmetros mais citados foram: o material e sua geometria, a massa, velocidade e a energia cinética do projétil além da máxima força de contato [36].

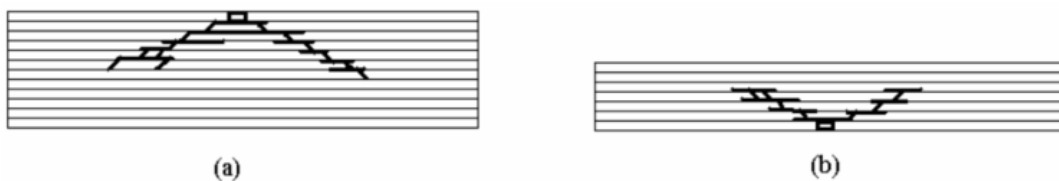
#### 2.3.1.1 Material e geometria

Danos em materiais laminados causados por impacto de baixa velocidade, são significativamente dependentes da geometria que se apresenta. Um laminado submetido a impacto transversal em baixa velocidade, a forma característica de falha na seção transversal da placa também é dependente de sua espessura. Para placas laminadas com

maiores espessuras, os danos na matriz polimérica estão localizados no lado onde ocorre o impacto, devido às ações mais significativas das tensões de contato do impactador, ocasionando trincas de cisalhamento. Os danos começam na superfície superior, reduzindo a rigidez do laminado, promovendo um estado crítico nas camadas e apresentando danos intralaminares e delaminações geometricamente similares a uma árvore do tipo pinus, Figura 14 (a).

Para laminados com menor espessura, as tensões de tração ocasionam, primeiramente, danos da matriz na superfície oposta à região de contato do impactador. Estes danos intralaminares, progredem para a região central criando delaminações, que reduzem a rigidez e promovem um estado crítico de tensões nas camadas subjacentes acima, gerando novos danos como trincas e delaminações, apresentando danos similares à uma árvore do tipo pinus, porém invertida, observado na Figura 14 (b).

Figura 14 – Formas características de falha em estruturas impactadas. (a) laminado com maior espessura.  
(b) laminado com menor espessura.



Fonte: Abrate,2002

Em relação ao projétil, saber suas dimensões e seu material, também é de grande importância. Estas propriedades, permitem calcular a razão de rigidez do impactador em relação à placa laminada. Um projétil é considerado rígido, quando esta razão é maior que 10. Projéteis mais flexíveis podem influenciar nos resultados, pois a força de contato fica dependente da resposta e interação de ambos [37].

A forma da ponta do projétil, é uma configuração geométrica importante. Diferentes formas, irão produzir danos muitos distintos. Projéteis com geometrias pontiagudas ou cônicas, tendem a quebrar as fibras. Já projéteis com geometrias mais esféricas, tendem a criar danos por delaminação, quando ambos comparados em laminados compósitos.

### 2.3.1.2 Massa do Projétil

Projéteis com grande massa apresentando baixa velocidade de impacto, podem não causar a mesma extensão de danos quando comparado com projéteis de massa pequena com alta velocidade, mesmo que as energias cinéticas sejam as mesmas.

Resultados de testes com baixa e alta velocidade de impacto em laminados compósitos, mostraram que quanto maior a massa do projétil, maior é a energia necessária para iniciar um dano no laminado. Também foi notado que, a variação da massa do projétil tem um efeito significativo na iniciação e no desenvolvimento do dano em laminados compósitos [38].

Ensaio realizados a uma alta velocidade, com distintas massas e uma mesma energia de impacto, provaram que, quanto menor a massa, menor é a área de dano e, maior é a resistência residual da placa.

Para ensaios feitos com uma velocidade de até 100m/s, pesquisadores estudaram a influência do aumento da massa do impactador no valor da máxima força de contato, para um mesmo nível de energia cinética. Foram realizados ensaios para diferentes níveis de energia. Para massas menores, à medida que a massa aumentava, foi observado um aumento da máxima força de contato, um aumento do valor da força para iniciação do dano no laminado e um aumento da área de dano. Porém, à medida que a massa aumentava, os resultados deixavam de apresentar tendência consistente. Com massas intermediárias, existia uma redução da máxima força de contato à medida que a energia de impacto aumentava, devido a iniciação do dano no laminado e na mudança dos modos de falha do material. Com maiores massas, não existia uma variação muito significativa da força de contato até um determinado nível de energia. Com isso, foi possível concluir que, com o aumento da massa, ocorria uma mudança na dinâmica de interação do laminado com o projétil, o que também ocasionava uma mudança nos mecanismos de dano no laminado [38].

Para ensaios realizados em baixa velocidade, a massa do projétil afeta o valor da energia inicial de dano. Entretanto, contrariando as afirmações dos autores anteriores, foi comparado resultados de testes experimentais, com velocidade do projétil até 20m/s em laminados compósitos reforçados de fibra de carbono. Eles concluíram, que a máxima força de contato depende somente da energia de impacto, independente da massa do

projétil utilizada neste faixa de velocidade, apresentando um comportamento quase-estático.

Devido a este comportamento quase-estático, foi estimado os danos no laminado, através de uma análise estática aplicando a máxima força de contato do impacto. Eles concluíram que esta metodologia não é válida para energias maiores que a energia  $E_{th}$  (energia de iniciação de danos) do laminado. Logo, o impacto em laminados em baixa velocidade com energias de impacto acima de  $E_{th}$  não são problemas quase-estáticos.

Embora existam conclusões divergentes na literatura sobre a influência da massa do projétil, pode-se concluir que para um mesmo nível de energia, o parâmetro da massa é mais importante no estudo com altas velocidades de impacto, do que com baixas velocidades [38].

### 2.3.1.3 Velocidade do projétil (Energia cinética e força de contato)

Igualando a energia cinética e a densidade de energia de deformação crítica:

$$pv^2/2 = \varepsilon^v \sigma^u / 2 \quad (1)$$

onde  $\varepsilon^v$  é a deformação na falha,  $\sigma^u$  a tensão na falha, e  $p$  a densidade do material, obtém-se a velocidade crítica “v” para a mudança do tipo de falha no laminado:

$$v = \varepsilon^v \sigma^u / p^2 = \varepsilon^v c \quad (2)$$

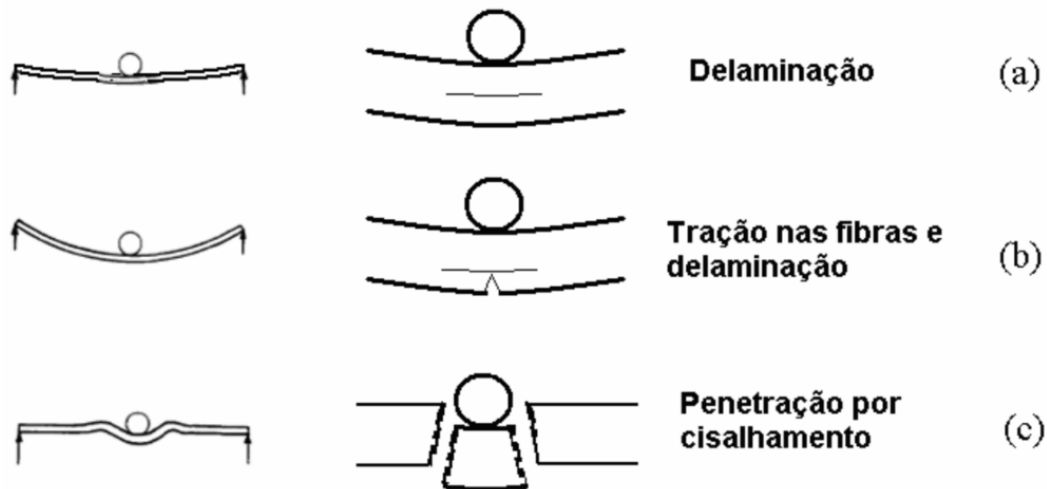
onde  $c$  é a velocidade de propagação do som no material.

Pesquisadores na área de compósitos, mencionam que a velocidade crítica “v” em materiais compósitos laminados, é em torno de 100m/s. A deformação e os tipos de danos esperados de um laminado impactado em baixa velocidade, é ilustrado na Figura 15 (a) e (b). Para velocidades superiores a 100m/s, o laminado é efetivamente rígido e será danificado localmente no ponto de impacto, conforme mostrado na Figura 15 (c).

Com amplas literaturas sobre o assunto, ainda é difícil definir baixa ou alta velocidade de impacto. CANTWELL e MORTON classificam como baixa velocidade valores até 10m/s, porém, ABRATE classifica-as até 100m/s.



Figura 15 - Representação da resposta e da falha na placa. (a) e (b) baixa velocidade de impacto.  
(c) alta velocidade de impacto.



Fonte: Cantwell e Morton, 2002.

Contudo, a energia absorvida pelo material, depende do tempo de contato com o projétil, sendo que para maiores tempos de contato, o material pode absorver mais energia por meio da deformação plástica dos diferentes componentes do laminado compósito. Por outro lado, altas velocidades de impacto, transmitem energia mediante ondas de tensão que se propagam no material ou dano localizado, pela incapacidade dos materiais de responder mais rapidamente. Alguns pesquisadores, partem dos tipos de danos causados no material, para definir e depois classificar o impacto como de baixa ou alta velocidade [39].

A energia cinética do projétil é dependente da massa e da velocidade. Deste modo, é mais comum na literatura, os estudos de impacto serem em função da energia cinética.

Muitos autores relatam que o impacto em laminados compósitos com um nível muito baixo de energia cinética, cria apenas trincas intralaminares. O comportamento do material é próximo de uma resposta elástica senoidal. Após o impacto, ocorre baixa ou nenhuma queda significativa da rigidez da estrutura. Todavia, à medida que a energia de impacto aumenta, surgem mais trincas intralaminares que se propagam entre duas lâminas, através de uma pequena área de delaminação. Por fim, com grande energia, o laminado já apresenta delaminações entre algumas camadas e, conseqüentemente, mudanças de rigidez da estrutura [39].

### 2.3.1.4 Impacto em Laminados Curvos

A análise e efeito das cargas de impacto em estruturas curvas, tem atraído a atenção de muitos pesquisadores. ARACHCHIGE E GHASEMNEJAD estudaram a detecção de danos pós-impacto de compósitos estruturais curvos de espessura variável. Eles aplicaram o modelo de remoção de camadas, para detecção de danos nas placas curvas, considerando um modelo semi-analítico [40].

Já KRISHNAMURTHY, estudou o comportamento de cargas de impacto em placas curvas em função do seu raio de curvatura, mostrando um efeito mais significativo quando o raio era maior [41].

Para ambos, os efeitos da deformação de cisalhamento também foi considerado, devido a tensão ocasionada no sistema. Eles descobriram que, considerar o efeito geometricamente não linear, resulta em forças de contato maiores e deflexões menores, em comparação com os problemas lineares equivalentes, enquanto o oposto é verdadeiro. Descobriram também que, uma curvatura maior, resulta em deflexões menores e forças de contato maiores.

SAJJAD, analisou danos por impacto em laminados compósitos curvos e submetidos a impactos de baixa velocidade de forma numérica e experimental, utilizando projéteis com geometrias esféricas. Com esta análise, foi possível observar que, quanto maior a área da superfície de contato entre o laminado e o projétil, menor a deflexão e a duração do tempo de contato [42].

Além disso, a área da zona danificada devido ao impacto, foi avaliada como outro fator importante na determinação do comportamento do laminado curvo sob impacto de baixa velocidade. Verificou-se, que o dano começa do lado oposto da face impactada e evolui em direção ao ponto de impacto.

SAGHAFI, analisou o efeito da pré-carga na resposta ao impacto de laminados compósitos. Esta pré-carga, está presente durante o processo de fabricação ou em serviço. O procedimento experimental, mostrou que a força máxima e a área danificada aumentam com a curvatura e, com isso, a tensão na região impactada. Foi possível concluir também que pequenos danos, devido a pré-carga, diminuiu a presença de delaminações na região analisada [43].

### 2.3.2 Degradação Ambiental

Degradação dos laminados compósitos poliméricos, é qualquer reação destrutiva, que pode ser causada por agentes químicos, físicos ou mecânicos ou em simultaneidade. A degradação, causa uma modificação irreversível nas propriedades dos compósitos poliméricos, sendo evidenciada pela deterioração progressiva destas propriedades, incluindo o aspecto visual. Em determinados casos, as reações de degradação podem ser desejáveis, como por exemplo, para rejeitos poliméricos não recicláveis, como sacos de lixos e embalagens de curta duração. Porém, em geral, as reações de degradação são indesejáveis, principalmente na aplicação aeroespacial [44].

Nos compósitos poliméricos, pode ocorrer a degradação da matriz, do reforço ou do sistema como um todo. Na ausência de luz e à temperatura ambiente, a maioria dos polímeros, são estáveis por longos períodos. Porém, sob a ação da luz do sol, a taxa de oxidação dos polímeros é acelerada e, este efeito pode ser exacerbado pela presença de poluentes atmosféricos, como nitrogênio e óxidos de enxofre, que são frequentes na atmosfera. Nesta condição, a degradação ocorre devido aos fenômenos de fotólise, decomposição química ocasionada devido a luz e foto-oxidação. De modo geral, a fotólise conduz primeiramente à insaturação do polímero. Por outro lado, a foto-oxidação conduz à produção de aldeídos e ácidos carboxílicos [44].

De acordo com estudos já realizados por Oliveira (2004), para o projeto de estruturas em materiais compósitos, é importante que o projetista conheça, além das propriedades mecânicas, o comportamento do material durante a vida útil do projeto, ou seja, quais mudanças irão ocorrer no compósito sob as condições requeridas de trabalho em uma determinada aplicação. No caso destas mudanças forem conhecidas antecipadamente, poderão ser levadas com consideração na fase de projeto e os limites aceitáveis de resistência e deformação, poderão ser estimados para a vida útil do componente/estrutura. Desta forma, tem-se a necessidade de estudar melhor o comportamento destes materiais, principalmente no que se refere à sua degradação frente a agentes ambientais. Conhecer os efeitos sobre os materiais compósitos, é de extrema importância para utilização em segmentos de alta responsabilidade [45].

Os mecanismos que controlam a durabilidade dos compósitos, incluem alterações químicas e físicas na matriz polimérica, redução da resistência e rigidez das fibras e perda da aderência na interface fibra-matriz. Considera-se que, nas condições ambientais

normais de serviço dos componentes/estruturas, tanto fibra quanto matriz podem ser afetadas por umidade, oscilações de temperatura, agentes químicos e radiação ultravioleta (UV).

Segundo SILVA, para avaliar a degradação de polímeros e materiais compósitos poliméricos em condição de serviço, esses materiais devem ser submetidos a ensaios de envelhecimento acelerado ou natural. Nestes ensaios de envelhecimento natural, o compósito é exposto às condições ambientais próximas da condição real de sua utilização. A grande vantagem deste ensaio, encontra-se justamente, em simular as condições reais de aplicação do material. Entretanto, o ensaio é lento e exige longos períodos de exposição para que os fatores de degradação possam agir no material [46].

Ainda segundo SILVA, os ensaios de envelhecimento acelerado possuem a vantagem da rapidez, fornecendo dados sobre o provável desempenho do material ao longo da sua vida útil. Nestes ensaios, são simuladas as condições de exposição do material, porém, com intensidades elevadas, de modo a acelerar o processo de degradação. Nos ensaios acelerados (envelhecimento), os processos normalmente estudados são a termo-oxidação, uso contínuo em temperaturas elevadas e criogênicas, a foto-oxidação, exposição à radiação ultravioleta e a absorção de umidade [46].

Os processos de degradação podem ser monitorados pelas mudanças no estado físico e nas propriedades mecânicas do material. Os ensaios mecânicos (tração, flexão e cisalhamento) e as técnicas de análises térmicas, mostram-se muito úteis para este fim.

O envelhecimento dos materiais compósitos, é normalmente classificado em envelhecimento físico e químico e cada um destes processos possui diferentes efeitos. Do ponto de vista da engenharia estrutural, é necessário conhecer quais propriedades são alteradas pelos processos de envelhecimento e também de que maneira estas alterações ocorrem. Deve-se, ainda, distinguir claramente os efeitos de endurecimento (*hardening*) e amolecimento (*softening*). O processo de amolecimento, ocorre quando o material perde resistência e rigidez (como no caso de falhas). Este processo, deve ser modelado com parâmetros do material dependentes do tempo em uma análise incremental. Já o processo de endurecimento, é aquele no qual o material se solidifica (por redução de volume livre, ou aparecimento de novas ligações cruzadas, etc) em uma configuração real [47].

O efeito da degradação, devido ao envelhecimento dos materiais compósitos, ocorre em diferentes ambientes e condições de serviço e limita-se severamente, a

durabilidade das estruturas/componentes que empregam estes materiais em sua constituição. Usualmente, existem efeitos da degradação química, térmica e radiação UV em associação com as tensões atuantes.

Segundo estudos realizados por OLIVEIRA, em estruturas de materiais compósitos, a degradação se dá basicamente de duas formas: uma química e outra física [48].

O envelhecimento químico, ocorre devido à oxidação que, aliada a outros fatores como temperatura e tempo de exposição, provocam alterações na estrutura molecular do material. Um efeito bastante conhecido do envelhecimento físico, é um fenômeno pelo qual os materiais amorfos, especialmente polímeros, buscam continuamente o equilíbrio termo-dinâmico, quando se encontram a temperaturas abaixo da T<sub>g</sub>. Durante esse processo, o material torna-se mais frágil, apresentando aumento na densidade e na rigidez e diminuição da sua viscosidade. O envelhecimento físico é termo-reversível, ou seja, se o material for mantido a uma temperatura acima de sua temperatura de transição vítrea por um determinado período, voltará a ter suas características originais [48].

Em termos da teoria de volume livre, muitas vezes referenciado apenas como envelhecimento físico. Quando um polímero é resfriado abaixo de sua transição vítrea, o material não atinge o equilíbrio termo-dinâmico instantaneamente. O equilíbrio do chamado volume livre do material, desenvolve-se gradualmente, durante um período no qual as estruturas moleculares alteram-se modificando o comportamento mecânico dos polímeros. Como resultado, apresenta um aumento de rigidez, densidade e da viscosidade e uma diminuição nas taxas de fluência e relaxação [48].

Vários estudos experimentais mostram que, os compósitos apresentam uma maior influência do envelhecimento físico nas propriedades dominadas pelo desempenho da matriz (cisalhamento), mesmo nos compósitos cuja sequência de laminação acarreta um comportamento dominado pelas características das fibras, os efeitos do envelhecimento físico são muito importantes. Os efeitos de volume livre no envelhecimento físico são reversíveis, quando o material é aquecido a temperaturas acima da T<sub>g</sub>. Este comportamento pode ser importante na análise de estruturas/componentes, que devem suportar elevadas temperaturas de serviço, como no seguimento aeroespacial [49].

Já o envelhecimento químico ou ambiental, é resultado de diferentes agentes como umidade relativa, condições de carregamento, radiação ultravioleta (UV), etc, e leva a

alterações irreversíveis na estrutura molecular do material. Exceto no caso de fibras naturais, é a matriz a maior responsável pelo desempenho em longo período dos compósitos. As matrizes poliméricas possuem comportamento viscoelástico influenciado pelas condições ambientais, como umidade, temperaturas e radiação UV [49].

A ação conjunta de todos estes fatores no comportamento e durabilidade dos materiais compósitos, é um fenômeno bastante complexo que ocorre a nível molecular. O estudo deste fenômeno e a modelagem do comportamento do mesmo, resulta em tarefas cruciais para determinação da vida útil e segurança das estruturas produzidas em material compósito.

### **2.3.2.1 Efeito da umidade**

Aeronaves e satélites são usados por longos períodos, portanto, é importante que os materiais utilizados na construção dos mesmos, mantenham suas propriedades durante todo o seu período de vida, mesmo em ambientes mais severos [50,51].

Efeitos tais como umidade e temperatura, presentes na atmosfera devem ser sempre considerados nos projetos de laminados estruturais. A umidade, por exemplo, penetra na matriz polimérica pelo processo de difusão, até que a concentração de equilíbrio seja atingida, sendo esse mecanismo acentuado pelo aumento da temperatura. Neste caso, a umidade pode causar a expansão volumétrica da matriz polimérica, podendo apresentar variações dimensionais e tensões internas [51].

Referências aos processos de degradação sob a ação simultânea de temperatura e umidade são encontradas na literatura (CÂNDIDO, FARIA e MAZUR). Esses efeitos de degradação, podem ser reversíveis quando a exposição ocorre por um período curto. Porém, quando exposto por tempos prolongados, com a combinação de umidade e mudança de temperatura, estes efeitos podem ser irreversíveis, causando a degradação química da matriz [52,53].

### **2.3.2.2 Efeito de Ciclos/Choques Térmicos**

Em aplicações aeronáuticas e espacial, os componentes estruturais podem ser submetidos tanto a esforços mecânicos, como a ciclos de variação de temperatura. Nos

compósitos poliméricos, repetitivos ciclos de variação de temperatura podem resultar no desenvolvimento de fadiga térmica do laminado, devido à diferença do coeficiente de expansão térmica existente entre as fases fibras e matriz, ao nível microscópico e também, devido à diferença no coeficiente de expansão térmica existente entre camadas adjacentes, quando empilhadas em diferentes orientações [53,54].

A definição de fadiga, de modo geral, segundo a norma ASTM E1823-96 9 (1996), é o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações, que pode culminar em trincas ou completa fratura depois de um número suficiente de flutuações [55].

Particularmente, a fadiga térmica é um modo de falha importante que ocorre em materiais submetidos a mudanças bruscas e cíclicas de temperatura, como em usinas termoelétricas e termonucleares, cilindros de laminação, turbina a gás, motores diesel, turbinas de aeronaves, satélites geoestacionários, entre outros [55].

A fadiga é por definição, um processo de aplicação repetitiva de ciclos térmicos, durante o qual tensões e deformações, são resultantes exclusivamente da imposição de gradientes de temperatura, sem a necessidade de cargas mecânicas. A falha inicia-se pela ocorrência de trincas na superfície do material, que se propagam com a continuidade da aplicação dos ciclos térmicos, podendo resultar em falhas catastróficas [56].

A resistência do material à fadiga térmica, é uma característica importante para o aumento da sua vida útil em diversas aplicações na engenharia. Por outro lado, é uma propriedade difícil de ser determinada experimentalmente, pois o comportamento em trabalho, é influenciado por número de fatores difíceis de serem reproduzidos em laboratório [57].

A condição real de carregamento térmico em serviço de estruturas, é difícil de ser simulada com precisão em laboratório. Entretanto, a simulação dos ciclos térmicos sofridos, deve ser tão precisa quanto possível. O corpo de teste no ensaio, deve ser capaz de reproduzir as condições de serviço do componente. Resultados obtidos, permitem avaliar a vida útil do material ensaiado, identificando os fatores que influenciam na durabilidade das estruturas utilizadas.

O tempo de vida útil do material ou resistência à fadiga térmica, é função do número de ciclos térmicos necessários para a ocorrência da primeira trinca. Porém, em

materiais, especialmente se o ciclo de fadiga térmica causa deformações, o instante no qual uma única trinca ocorre, torna-se de difícil identificação, como também a presença de uma rede de finas trincas na superfície pode aparecer quase simultaneamente [57].

Fadiga térmica é o termo usado para relacionar as variações dos gradientes de temperatura ao carregamento e às deformações cíclicas. Os grandes problemas de fadiga térmica envolvem tanto os carregamentos mecânicos, quanto os carregamentos induzidos pela temperatura, mostrando que a fadiga térmica pode ser mais severa que a fadiga mecânica [57].

A expressão fadiga térmica foi muito usada para referirem-se às falhas provocadas pelos esforços repetidos induzidos termicamente, como aqueles que resultam de gradientes de temperatura e de esforços de compressão para evitar a expansão entre componentes diversos. Uma proporção elevada de falhas por fadiga térmica em trabalho é causada pelo gradual trincamento dos materiais, sob ciclos de temperatura repetitivos, e um entendimento de suas características conduzirá ao projeto satisfatório de componentes que sofrem ciclos de temperatura e carga em serviço [57,58].

Um dos problemas mais severos observados em materiais compósitos sob elevados ciclos de variação de temperatura, é o rompimento da colagem entre seus constituintes. Até o momento, poucos trabalhos foram realizados com relação ao desenvolvimento de danos causados por fadiga térmica ou variações súbitas de temperatura em materiais compósitos.

De acordo com a literatura (PAPANICOLAOU, XEPAPADAKI e TAGARIS), sob ciclos térmicos, o primeiro dano que pode ser observado são as microtrincas formadas na matriz polimérica. Essas microtrincas, não somente afetam as propriedades mecânicas e térmicas do material compósito, mas também constituem pequenos caminhos pelos quais agentes corrosivos podem penetrar no material. Além disso, microtrincas agem como nucleadores de outros tipos de danos como fraturas longitudinais e delaminações [57,58].

As microtrincas induzidas a partir de elevadas variações cíclicas de temperatura, em diferentes tipos de matrizes poliméricas (termorrígidas e termoplásticas), são desenvolvidas por diferentes mecanismos, dependendo da natureza química de cada matriz. Por exemplo, as resinas epóxis são mais rígidas e frágeis, quando comparada com matriz termoplástica. Assim, no caso da resina epóxi, predomina a formação de elevada



densidade de trincas transversais. Já no caso da maioria das matrizes termoplásticas, devido à sua natureza viscoelástica, há a formação de baixa densidade de trincas longitudinais [56,57].

O aumento na densidade de trincas originadas por fadiga térmica pode ser medido a partir do amortecimento mecânico do material compósito, submetido ao condicionamento por variações súbitas de temperatura. A fricção gerada nas microtrincas, pode causar aumento do fator de perda,  $\tan \delta$  da matriz polimérica [57,58].

Neste tipo de ensaio, os corpos de prova são submetidos a variações cíclicas de temperatura, entre  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ , sendo esta a faixa de temperatura na qual satélites convencionais operam. Dessa forma, um estudo sistemático simulando as variações de temperatura de um satélite em serviço, bem como o impacto dessas variações no desempenho mecânico e físico-químico dos materiais utilizados em aplicações aeroespacial se faz necessário, conferindo, assim, maior segurança [58].

#### **2.4 Danos por Impacto em Laminados Curvos Submetidos à Ciclagem/Choques Térmicos**

Existem diversas bibliografias com objetivo de analisar o comportamento do laminado compósito, tanto em ambiente exposto a cargas de impacto, quanto em ambientes onde se busca entender melhor o comportamento do laminado em temperaturas criogênicas.

Porém, ainda é precário estudos onde se objetiva melhor aprofundamento de laminados compósitos na condição de maior complexidade geométrica em ambientes expostos a cargas de impacto e ciclagem térmica. Esta condição é encontrada na órbita terrestre, onde componentes de satélites são submetidas a ambientes severos de trabalho, já comentado anteriormente.

FERNANDES, estudou o comportamento de cargas de impacto em placas curvas com histórico de ciclagem térmica. Neste estudo, foi possível concluir que corpos de prova que receberam maiores quantidades de ciclagem térmica, apresentaram maiores volumes de trincas e delaminações após a carga de impacto [59].

DAL PRÁ, investigou o comportamento de danos causados em placas de curvatura constante de laminados compósitos de pequena espessura, realizando choques

térmicos e ensaios balísticos, simulando o ambiente nas proximidades do orbital exosférico. Com este estudo, foi possível concluir que, maior é a resistência ao impacto quanto menor o número de ciclos térmicos sofridos pelo laminado compósito analisado. Mostrando que choques térmicos são extremamente prejudiciais, em especial, se o material já apresentar danos decorrentes de carregamentos em serviços ou falhas no processo de manufatura [60].

Outro fator que conseguiu ser extraído deste estudo, foi na resistência do material em função do seu raio de curvatura. Corpos de prova com raios de curvaturas menores, foram expostos a maiores tensões durante a flambagem e tendem a sofrer mais danos durante os choques térmicos e conseqüentemente, impacto.

## **2.5 Inspeção Não-Destrutiva**

De acordo com a *American Society for Nondestructive Testing* (ASNT), os END's (ensaios não destrutivos) são definidos como processos de inspeção, teste ou avaliação em materiais, componentes ou sistemas, na procura por discontinuidades ou diferenças nas suas características, sem colocar em causa as suas propriedades, performance ou utilidade futura [61].

Existem vários métodos de END's, sendo os principais: ensaio visual (VS), ensaio por líquido penetrante (LP), partículas magnéticas (PM), radiografia (R), Ultrassom (US), Termografia (TIV), correntes parasitas (CP), entre outros. Cada método apresenta um leque variado de técnicas.

Muitas vezes um método de inspeção complementa o outro, como por exemplo, o ensaio por líquido penetrante é muito limitado, pois é usado para encontrar discontinuidades apenas na superfície, e muitas vezes é preciso utilizar o ensaio por partículas magnéticas para análise além da superfície, mas também subsuperficial. Este procedimento é muito comum no segmento metalúrgico, onde normas muito rigorosas regem para garantia da sanidade do componente [62].

A Tabela 2 fornece uma lista classificatória de vários métodos disponíveis para inspeção não-destrutiva, com base nos princípios fundamentais que regem a operacionalização dos métodos de END [62].

Tabela 2 - Classificação dos métodos de END de acordo com os princípios básicos que regem seu funcionamento.

<b>Categorias Básicas de END</b>	<b>Objetivos da Aplicação</b>
<b>Mecânica e Visual</b>	Determinação de cor, trincas, dimensões, espessura do filme, refletividade, distribuição de tensão e magnitude, acabamento de superfície, defeitos de superfície e trincas transpassantes.
<b>Radiação Penetrante</b>	Trincas, variação de densidade e diferenças químicas, distribuição elementar, objetos estranhos, inclusões, microporosidade, desalinhamento, falta de peças, segregação, degradação durante o serviço, encolhimento, espessura e vazios.
<b>Eletromagnética e Eletrônica</b>	Teor de liga leve, anisotropia, cavidades, trabalho a frio, tensão localizada, dureza, composição, contaminação, corrosão, profundidade de trinca, estrutura cristalina, condutividade elétrica e térmica, tratamento térmico, inclusões, espessura da camada, umidade, polarização, solda, segregação, encolhimento, estado de cura, resistência à tração e espessura.
<b>Sônica e Ultrassônica</b>	Iniciação e propagação de trincas, vazios, fator de amortecimento, grau de cura, grau de impregnação, grau de sinterização, separações, densidade, dimensões, módulo elástico, tamanho de grão, inclusões, degradação mecânica, desalinhamento, porosidade, degradação por radiação, degradação da estrutura de compósitos, tensão superficial, resistência à tração, cisalhamento, compressão e desgaste.
<b>Térmica e Infravermelho</b>	Solda, composição, emissividade, contornos, espessura, porosidade, refletividade, tensão, condutividade térmica, espessura, vazios, delaminações, trincas e corpos estranhos.
<b>Química e Analítica</b>	Identificação de liga, composição, danos, análise elementar e distribuição, tamanho de grão, inclusões, macroestrutura, porosidade, segregação, defeitos de superfície.
<b>Geração de Imagem</b>	Variações dimensionais, desempenho dinâmico, anomalia caracterização e definição, distribuição de defeitos e propagação, configurações de campo magnético.
<b>Análise de Sinal e Imagem</b>	Dados de seleção, processamento e visualização, mapeamento de danos e defeitos, identificação de correlação, aprimoramento de imagem, separação de variáveis múltiplas, análise de assinatura.

Fonte: SWIDERSKI, 2002.

## 2.5.1 Radiografia

### 2.5.1.1 Fundamentos da Radiografia e Aplicações

Ensaio radiográfico é um método não-destrutivo para a inspeção de peças/componentes, com objetivo de analisar defeitos e danos em que se emprega

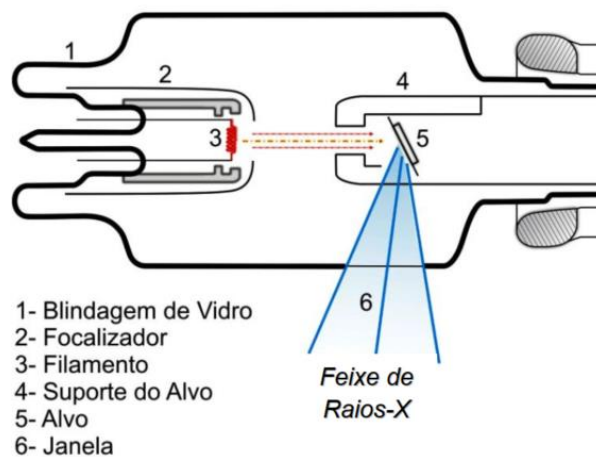
radiação eletromagnética de alta energia. Este método é empregado para avaliar defeitos internos, tais como vazios e porosidades. Porém, com orientação adequada entre a incidência do feixe de radiação ionizante e o plano de uma delaminação em um laminado compósito estrutural, pode ser adequadamente caracterizado quando submetido a análise de danos por impacto.

A radiografia é efetiva quando se deseja analisar peças com geometrias complexas, difíceis de serem inspecionadas pelo método ultrassônico, sendo bastante usual na detecção de trincas na matriz, orientação de fibras, inclusões, dentre outros defeitos quando aplicado a materiais laminados compósitos estruturais [63].

### 2.5.1.2 Geração de Raio-X

Raios-X podem ser produzidos em pacotes discretizados de energia chamados fótons, como a luz visível. Há dois diferentes processos para a produção de fótons de raios-X, os quais podem ocorrer em átomos pesados, como de tungstênio frequentemente empregado como alvo ou ânodo de um tubo de raios-X, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Tubo de raios-X ilustrando o processo de geração da radiação-x ionizante



Fonte: Adaptado BEINE 2010.

Ambos os modos de produção de radiação ionizante, envolvem a mudança dos estados eletrônicos. No primeiro comentado, a radiação-X é emitida quando um elétron em movimento, projetado contra um alvo de tungstênio, é desacelerado no choque com alvo de elevado peso atômico. O elétron negativamente carregado, tem sua velocidade reduzida após orbitar em torno de um átomo positivamente carregado de tungstênio. Este

processo de perda de energia, produz um espectro contínuo de radiação-X, o qual é empregado, por exemplo, na inspeção não-destrutiva de peças aeronáuticas que precisam de grande responsabilidade em trabalho [63].

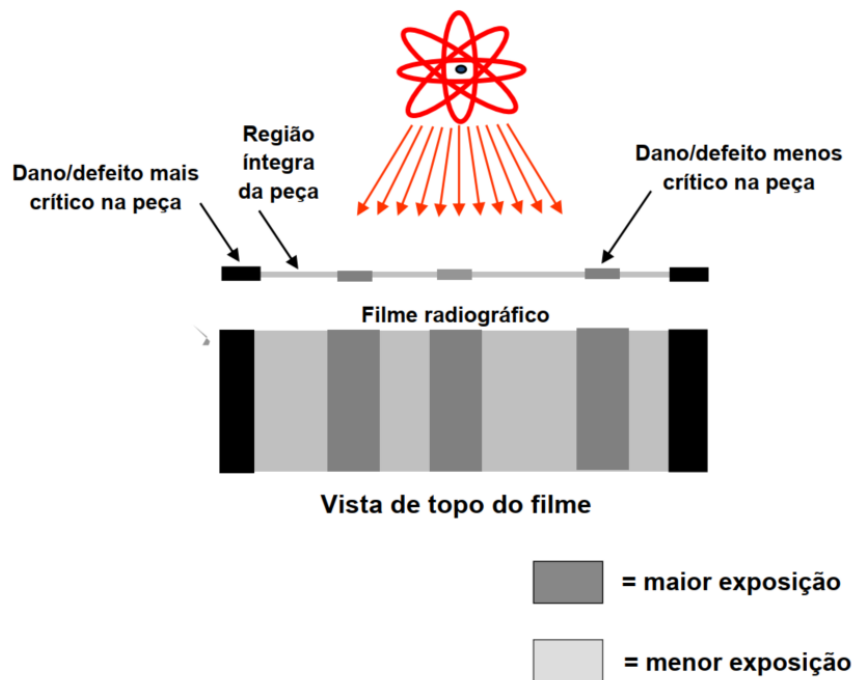
O segundo modo de produção de raios-X, envolve a projeção de um elétron acelerado contra um átomo e o suprimento de energia a um elétron deste último que o permita retirá-lo de um nível energético inferior (camada K, por exemplo) e elevá-lo a um nível superior (para camada L, por exemplo). Aproximadamente 0,1% dos elétrons produzem vacâncias na camada K e, a maioria produz calor. Deste modo, um elétron de tungstênio pertencente a uma camada mais externa da eletrosfera, pode cair na camada K. Esta quantidade excedente de energia entre os dois estados, surge como um fóton emitido de raios-X. O segundo modo produz raios-X de maior intensidade, quando comparado com a radiação gerada pela desaceleração de um elétron, no exemplo em questão, parte como uma onda eletromagnética de comprimento bem definido [63].

### **2.5.1.3 Operacionalização da técnica radiográfica**

A Figura 17 mostra de forma simples, porém bastante objetiva, uma esquematização geral do processo de inspeção radiográfica. O corpo de prova ou componente, 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 revelado, de modo a se obter a imagem (o negativo), e as regiões contendo defeitos ou danos no corpo de prova inspecionado aparecerão mais escuras quando comparado com as regiões íntegras, visto que, neste último caso, mais energia eletromagnética foi absorvida pelo material, diminuindo a parcela de energia que correspondentemente atinge e sensibiliza fonicamente o filme [64].

O mapeamento realizado dos defeitos ou danos é bi-dimensional, de modo que não é possível, ou pouco viável em termos práticos, identificar a profundidade da indicação interna do corpo de prova/componente inspecionado.

Figura 17 – Esquemática da inspeção radiográfica por filmes (radiografia convencional ou analógica)

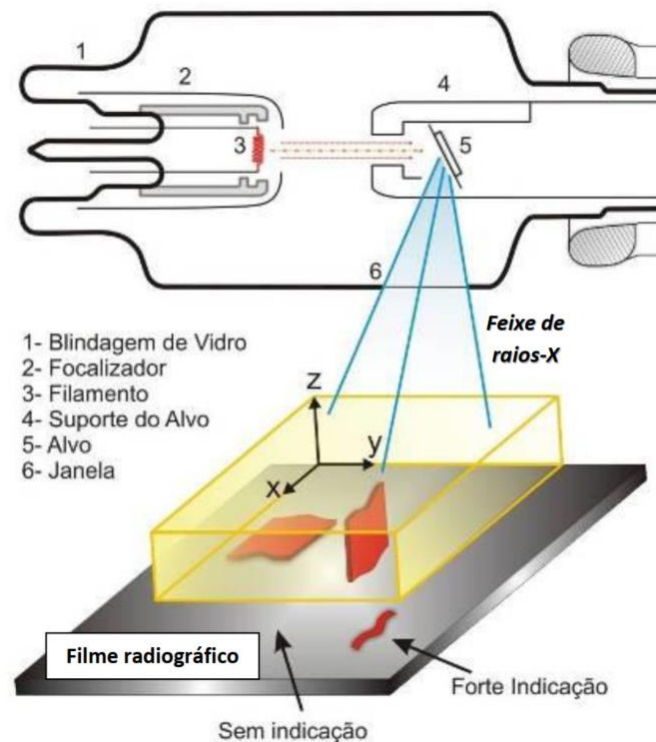


Fonte: Adaptado BALASKO 2004.

#### 2.5.1.4 Efeito da Orientação do Defeito/Dano e Outras Limitações

Em oposição ao método de inspeção ultrassônica, que será visto posteriormente, 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, (mostrado na Figura 18). Este fenômeno ocorre porque nestas condições, maior será a distância percorrida pelos fótons na região de menor densidade da peça (ar no interior do dano) e, portanto, menor será a perda de energia destes fótons até que atinjam o filme radiográfico, causando grande sensibilização fotônica e, proporcionando uma fácil diferenciação com relação às regiões correspondentes à porção íntegra do componente, visto que os fótons que interatuam com a matéria sólida, estarão menos energizados quando alcançarem o filme devido à alta atenuação que experimentaram, e conseqüentemente, pouco sensibilizarão o filme fotográfico [64].

Figura 18 – Tubo de raios-X ilustrando o processo de geração da radiação ionizante



Fonte: Adaptado BALASKO 2004.

Além das limitações mencionadas acima, outras limitações adicionais se impõem ao método, podendo citar a interpretação e a discriminação dos danos/defeitos, que são difíceis para peças e componentes com geometrias complexas, além de requerer acesso aos dois lados do componente. Outras limitações que se destacam, são o alto custo do filme radiográfico e manutenção dos equipamentos, devido às rígidas diretrizes e normas de segurança e de saúde [65].

Importante mencionar que a qualidade final da imagem radiográfica, depende fortemente da escolha do filme, que por sua vez é uma função dos tipos de danos, espessura e material que se deseja inspecionar. Todos estes parâmetros são interdependentes, podendo-se concluir pela alta complexidade do planejamento necessário para a execução de uma tomada radiográfica bem-sucedida.

## 2.5.2 Ultrassom

### 2.5.2.1 Princípios básicos do método

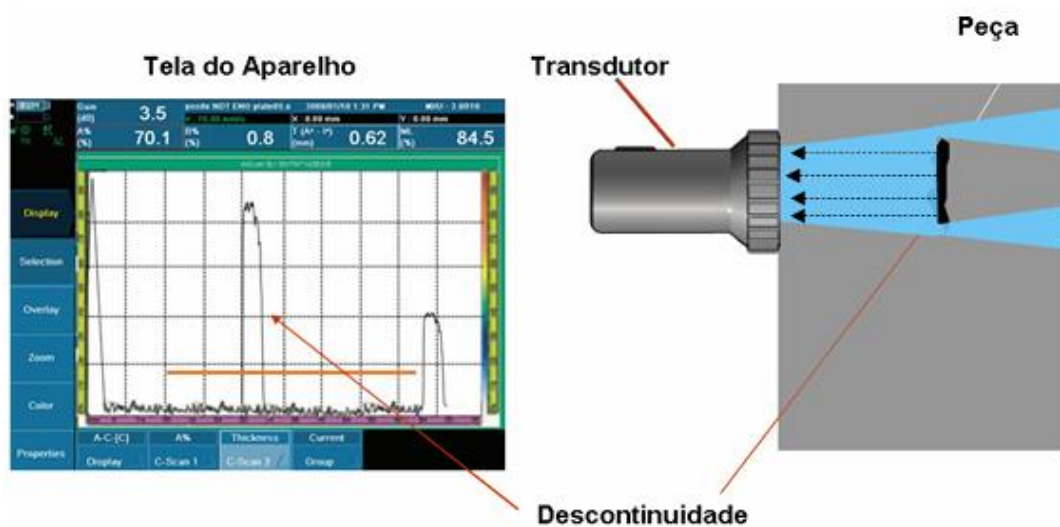
Sons extremamente graves ou agudos podem passar despercebidos pelo aparelho auditivo humano, por caracterizarem vibrações com frequências muito baixas, até aproximadamente 20Hz (infrassom) ou por apresentarem frequências muito altas, acima de 20KHz (ultrassom), ambas inaudíveis [66].

Os sons produzidos em um ambiente qualquer, refletem-se ou reverberam nas paredes que consistem no mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Este fenômeno, apesar de simples e serem frequentes em nosso cotidiano, constituem os fundamentos do ensaio por ultrassom.

Assim como uma onda sonora, reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico, que pode ser um metal, plástico, concreto, compósito etc, refletirá da mesma forma ao incidir numa descontinuidade interna neste meio considerado. Através de aparelhos bastante específicos, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça em teste, mapeando e interpretando as descontinuidades.

Na Figura 19, o feixe sônico do transdutor incidiu na falha, apresentando uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, enviando o sinal ao aparelho, mostrado na tela em forma de um pulso ou eco.

Figura 19 – Princípios básicos da inspeção de materiais por ultrassom.



Fonte: Adaptado ASME, 2016.



### **2.5.2.2 Finalidade do Ensaio**

O ensaio por ultrassom é caracterizado como um método de ensaio não destrutivo, que tem por objetivo a detecção de danos na região interna do material de teste. Tais danos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componente a ser examinado, como por exemplo, trincas e delaminações em materiais compósitos.

Deste modo, o método por ultrassom, assim como outros métodos não destrutivos, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de maiores responsabilidades [66].

### **2.5.2.3 Campo de aplicação**

Em aproximadamente 1929 o cientista Sokolov, fazia as primeiras aplicações da energia sônica em materiais metálicos, enquanto em 1942 Firestone, utilizaria o princípio da ecosonda ou ecobatímetro, para exames de materiais. Somente em 1945, o método por ultrassom iniciou sua caminhada em escala industrial [67].

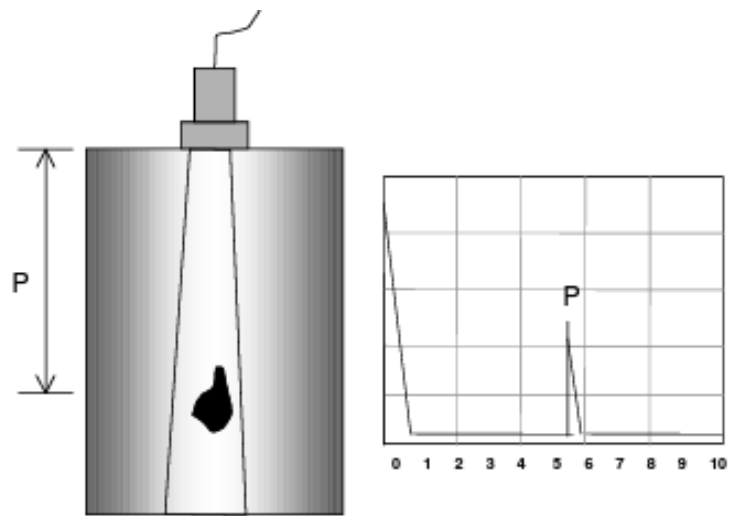
Atualmente, as principais indústrias nos segmentos metalúrgico, estruturais, automobilístico e aeronáutico empregam o exame ultrassônico, pois o método constitui-se em uma ferramenta indispensável para a sanidade do componente, além de ter como objetivo principal, garantir a qualidade nas regiões internas, onde outros métodos não destrutivos não conseguem ser empregados.

### **2.5.2.4 Técnicas de ensaio**

A inspeção pelo método por ultrassom em materiais, pode ser efetuada através de três técnicas: técnica por transparência, por pulso-eco e por imersão, sendo a segunda utilizada neste trabalho.

A técnica por pulso-eco, é caracterizada onde um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material. Portanto, o transdutor é acoplado em somente um lado da peça de teste, conforme mostrado da Figura 20.

Figura 20 – Técnica pulso-eco



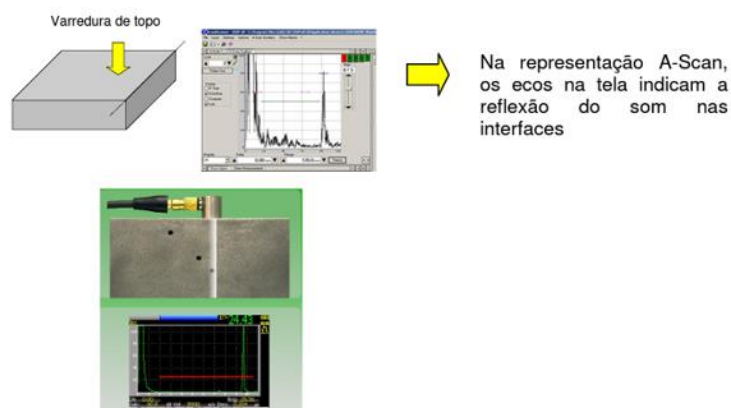
Fonte: Adaptado ABNT. 2018.

### 2.5.2.5 Formas de representação

A tela do aparelho de ultrassom pode apresentar de três formas a secção da peça em teste, sendo: A-scan, B-scan e C-scan. Devendo ser necessário incorporar circuitos eletrônicos especiais para cada forma de apresentação [67].

A-scan – Neste tipo de apresentação, a tela do aparelho mostra a forma tradicional de visualização da tela, ou seja, na forma de ecos de reflexão, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Representação A-scan.

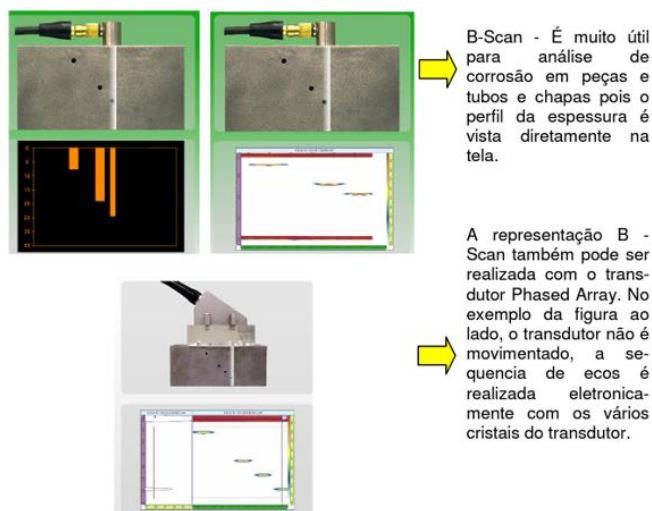


Fonte: Adaptado ABENDI, 2014.

B-scan – nesta apresentação, a tela do aparelho mostra a seção transversal da peça em teste e, portanto, a visualização da peça é feita em corte. Este tipo de apresentação

não é convencional, e somente aparelhos com funções específicas, são capazes de mostrar esta forma, conforme mostrado na Figura 22.

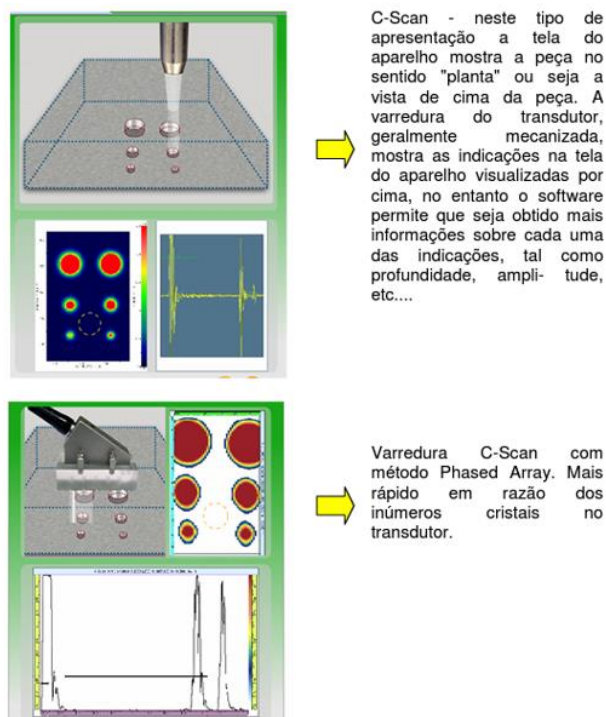
Figura 22 – Representação B-scan.



Fonte: Adaptado Shull, 2002.

C-scan – Este tipo de apresentação é muito específico e pouco convencional e, somente aparelhos dotados de funções especiais, são capazes de mostrá-la, conforme apresentado na Figura 23 [68].

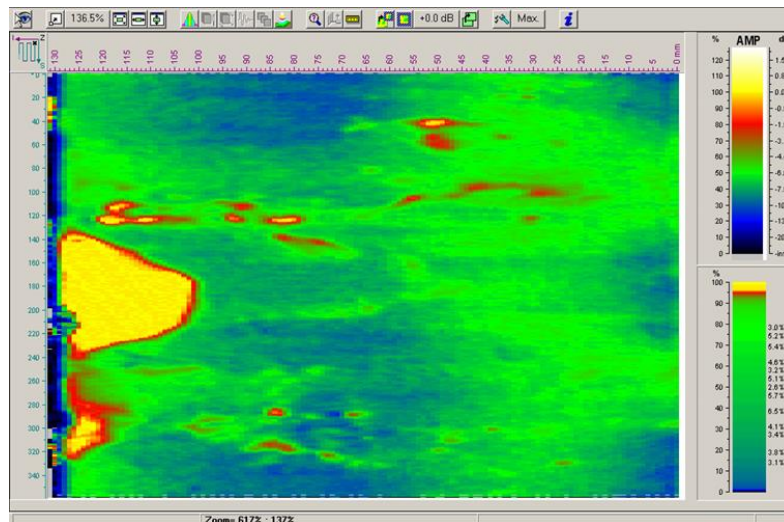
Figura 23 – Representação C-scan.



Fonte: Adaptado MITREVSKI *et al*, 2006,

Neste tipo de apresentação, a tela do aparelho exibe a peça no sentido planta, representando a vista de cima da mesma. A representação C-scan na Figura 24, foi obtida a partir da varredura automática da superfície de uma peça com revestimento, onde pode ser vista as áreas amarelas (mais claras), indicando a total falta de aderência do material de revestimento [68].

Figura 24 – Representação C-scan de uma peça com revestimento, as áreas amarelas mostram falta de aderência do revestimento no metal base.



Fonte: Adaptado DUCHENE et al., 2018.

A palheta colorida do lado direito, representa a variação da amplitude do eco da interface entre o revestimento e metal base, sobre toda a superfície ensaiada.

Este modo de varredura é efetuado, conectando um sistema eletrônico de coordenadas X, Y denominado “*encoder*” fixado na peça, que emite um sinal ao aparelho de ultrassom, sempre que um ciclo do ensaio for completado como, por exemplo, varredura no sentido do comprimento ou largura da peça e uma mudança da região de varredura é requerida [68].

A varredura automática e captação de dados pelo aparelho de ultrassom, representa hoje um avanço bastante significativo no processo de inspeção industrial, pois uma série de informações coletadas sobre as indicações, são armazenadas somente pelo aparelho, dispensando a participação do inspetor. O mapeamento obtido, é gerado pelo software que impossibilita alterações.

### **2.5.2.6 Vantagens**

O método por ultrassom, possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, como por exemplo:

- Trincas, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes;
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção;
- No caso de radiografia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo, além do alto custo;
- Ao contrário dos ensaios por radiações, o ensaio por ultrassom não requer planos especiais de segurança ou qualquer acessório para sua aplicação;
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas durante o ensaio, são fatores intrínsecos ao exame por ultrassom, enquanto outros métodos não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade e em muitos casos, este é um fator importante para proceder com reparo [69].

### **2.5.2.7 Limitações em relação a outros ensaios.**

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor;
- O registro permanente do ensaio não é facilmente obtido;
- Faixas de espessuras muito finas, constituem uma dificuldade para aplicação da técnica;
- Requer o preparo da superfície para sua aplicação;
- É comum a insegurança do inspetor quanto à identificação da indicação detectada na tela do aparelho [69].

## **2.5.3 Termografia**

### **2.5.3.1 Fundamentos da Termografia**

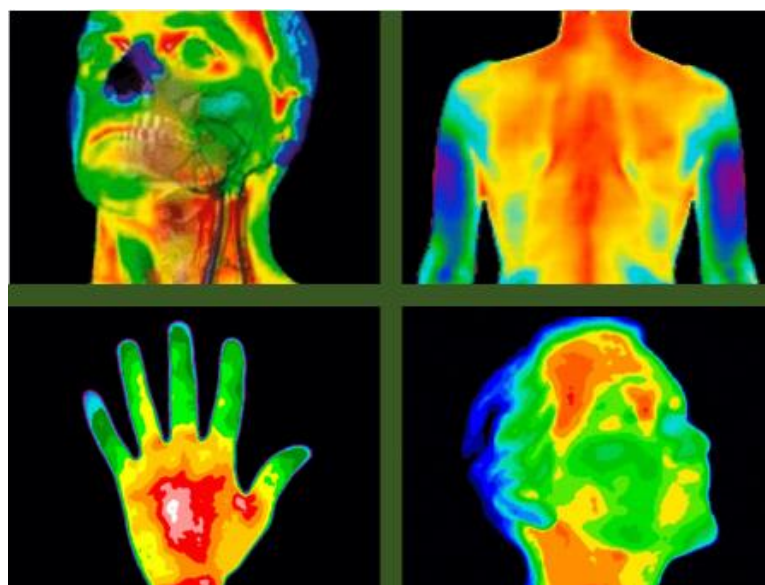
A TIV (Termografia Infravermelha), é utilizada para medir ou mapear temperaturas superficiais, tendo como base a radiação infravermelha emitida por um corpo. A premissa crucial para entender a TIV, é que o calor que emana da superfície de

um corpo é afetado pelas discontinuidades presentes nele. A presença destas falhas, irá provocar diferentes gradientes de temperatura na superfície do componente ao longo do tempo, por alterar as propriedades térmicas do material permitindo a sua detecção utilizando uma câmara termográfica, por exemplo [70].

### 2.5.3.2 Aplicações

O campo da termografia teve uma rápida evolução, devido aos progressos nos campos dos seus detectores de calor, eletrônica e nos computadores que são usados para fazer o processamento das imagens. A TIV é aplicada atualmente, em diversas áreas como monitoramento e manutenção preditiva, detecção de espécies gasosas entre outros. Além de ser uma tecnologia que vem se adaptando e surgindo no dia a dia das pessoas, como por exemplo no caso de aferição de temperatura sem contato utilizando uma câmera infravermelho (amplamente usado na pandemia da COVID-19). A termografia é também considerada um excelente exemplo de visualização, que consegue de uma forma menos complexa, mostrar o que acontece quando reflexos de uma mudança de temperatura ocorrem em um objeto que está sendo observado. A Figura 25, remete ao uso de técnicas de processamentos da termografia infravermelha no campo da medicina, para detecção de câncer, tendo como grande vantagem, o fato de ser uma alternativa menos invasiva [71].

Figura 25 - Exemplo de imagem TIV utilizada no campo da medicina para estudos na descoberta de câncer.



Fonte: GONCALVES, 2017.

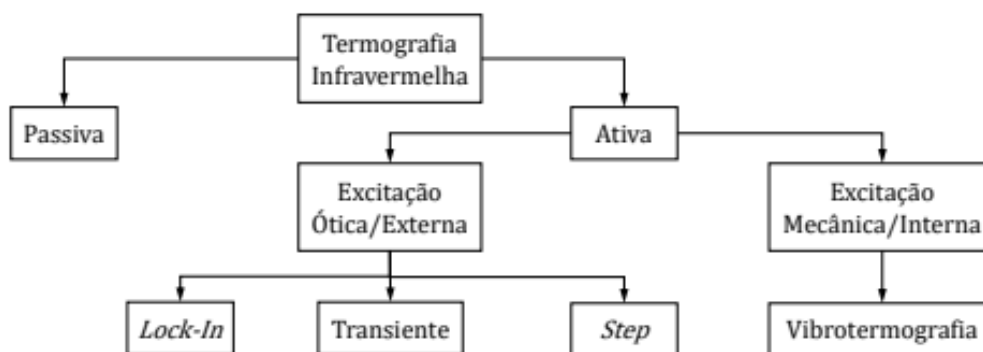
### 2.5.3.2 Técnicas de ensaio

Existem duas abordagens que podem ser realizadas na TIV: passiva ou ativa. Em ambos os casos, uma imagem térmica é obtida para analisar a distribuição de temperaturas na superfície.

Na abordagem passiva, o componente a ser inspecionado é monitorado na sua temperatura natural, que é normalmente superior a ambiente, num regime estável e sujeito a condições normais: uma mudança no seu comportamento normal ou esperado, é associado a danos ou mau funcionamento do corpo. Algumas das suas variadas aplicações são: manutenção preventiva de pontes, isolamento térmico, condutas de circulação de ar e rolamentos; obtenção de imagens de atividade metabólica juntos à superfície de tecidos humanos; vigilância e sistemas noturnos [72].

Na abordagem ativa, muito diferente da abordagem passiva, é necessária uma fonte de calor (ou frio) externa, para estimular a peça introduzindo energia ao sistema sob inspeção provocando uma diferença de temperatura. Essa diferença de temperatura pode ser monitorada (por uma câmera). Anomalias presentes na peça, provocaram um padrão diferente de temperatura quando comparado a uma área sã, tornando possível sua detecção. Dependendo da forma como a energia é introduzida, é possível realizar uma classificação das diferentes técnicas da TIV, representada na Figura 26 [73].

Figura 26 - Diferentes abordagens à TIV.



Fonte: Karbhari, 2013.

A perturbação do corpo, é controlada e imposta durante um período de tempo. Esta pode ser realizada de forma óptica com recurso a lâmpadas, aquecedores infravermelhos ou mantas térmicas, mas também de forma mecânica/interna. Micro-

ondas e ondas ultrassônicas, podem ser utilizadas para gerar calor no interior do material. A frequência dos pulsos de energia, a duração da introdução de energia e a forma como as diferenças de temperatura são analisadas, permite classificar diferentes tipos de Termografia Ativa, tais como: LT (*lock-In Thermography*), onde o aquecimento ocorre de forma periódica e a uma determinada frequência que se mantém durante certo tempo. Neste processo, observa-se como as respostas de perfis de temperatura na superfície do componente se apresentam [74].

Outra técnica muito utilizada é PT (*Pulse Thermography*), neste caso, um pulso de energia rápido é utilizado na superfície do componente, enquanto a câmera captura durante o resfriamento ou aquecimento, para encontrar diferença nos possíveis danos existentes. SPT (*Square Pulse Thermography*) é uma técnica que diferente da PT, possuindo um pulso mais longo, portanto, os processos de resfriamento e aquecimento são mais longos também [74].

LT, PT, e SPT são geralmente implementadas, com um aquecimento cobrindo uma grande área da superfície. Porém, existem algumas variações onde usa-se um ponto ou uma linha para o aquecimento. São as chamadas *Point* ou *Line Scan Thermography*, que consistem na varredura de pontos ou linhas da amostra, geralmente por lasers, lembrando que esta necessita de uma configuração dinâmica, onde a fonte de calor se move por toda a superfície da amostra.

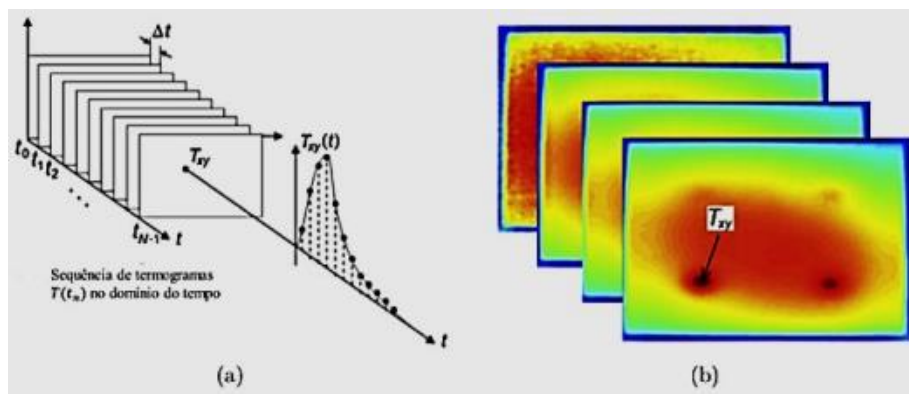
A última, mas não menos importante, é a SHT (*Step Heating Thermography*) sendo muito semelhante à técnica SPT, no entanto, o foco das capturas é ao aquecimento da amostra. Nesta dissertação será utilizado a Termografia ativa pulsada ou somente Termografia pulsada [74].

Como comentado de maneira breve anteriormente, na termografia pulsada (PT), o corpo de prova é submetido a um pulso de calor usando fonte de alta energia como um flash fotográfico. Um pulso de calor, pode ser visto uma combinação de várias ondas periódicas em diferentes frequências e amplitudes. Após a onda de calor entrar em contato com a superfície do corpo de prova inspecionado, ela percorrerá até o interior do mesmo por condução. Em determinado intervalo de tempo, a temperatura da superfície inicialmente excitada termicamente, cairá uniformemente para um corpo de prova sem danos ou defeitos internos. Descontinuidades presentes na superfície ou na subsuperfície do espécime, como, por exemplo, porosidades, delaminações, etc, podem ser vistas como



“barreiras” ao fluxo de calor que produzem padrões de temperatura anormais na face inspecionada do corpo de prova. Na análise de um pixel de certos termogramas, é possível a detecção de falhas não homogêneas, podendo ser realizada de duas formas: tomando-se a variação da intensidade de um pixel ao longo do tempo (análise temporal), ou de forma espacial na imagem pela correspondência de uma paletas de cores, onde cada coloração se refere a uma temperatura, conforme pode ser observado nas Figura 27 (a,b). Algumas cores quentes incluem, em ordem decrescente de temperatura: a branca, vermelha, e laranja, enquanto cores frias, em ordem crescente de temperatura, seriam a preta, azul, e verde, sendo então a cor amarela intermediária às duas escalas acima [75].

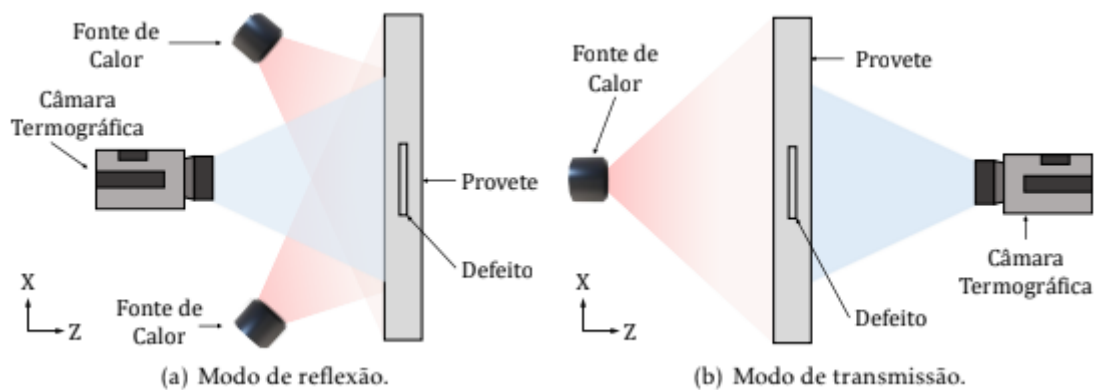
Figura 27 - Análises temporal (a), e espacial (b) via método PCT.



Fonte: GRYS, 2015.

Na TIV ativa podemos citar, ainda dois modos de observação possíveis: transmissão e reflexão. No modo de reflexão, a fonte de calor externa e o detector da radiação, encontram-se simultaneamente do lado da peça a ser observada. A vantagem acrescida deste modo, prende-se a ser necessário aceder apenas a um lado da peça, ou seja, não à necessidade de acesso ao lado oposto. No modo de transmissão, a câmara termográfica e a fonte de calor encontram-se em lados opostos da peça, o que apresenta uma elevada limitação para inspecionar determinados componentes. A Figura 28 apresenta uma representação esquemática de uma inspeção de PT pulsada de ambos os modos [76].

Figura 28 - Esquematisação dos diferentes modos de aplicação da TIV.



Fonte: Ciampa, 2018.

#### 2.5.3.4 Vantagens

As principais vantagens do método de ensaio por termografia são:

- ✓ Rapidez da inspeção;
- ✓ Interpretação simples dos resultados (através de imagens);
- ✓ Possibilidade de análise em tempo real;
- ✓ Uso de radiação não letal;
- ✓ Não requer contato;
- ✓ Inspeção global da peça;
- ✓ Acesso a apenas um lado da peça;
- ✓ Não sensível à geometria da peça;
- ✓ Adequado para grandes superfícies.

#### 2.5.3.5 Desvantagens

As principais desvantagens do método de ensaio por termografia são:

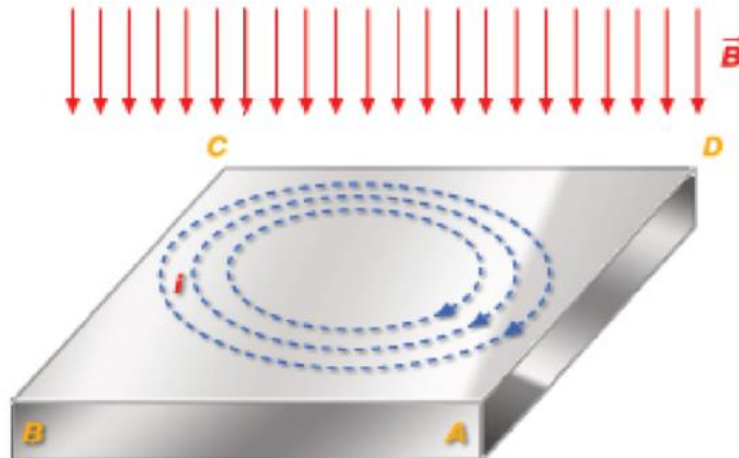
- ✓ Uniformidade de aquecimento/resfriamento;
- ✓ Custo elevado;
- ✓ Laminados de espessuras limitada;
- ✓ Detecção de defeitos poucos profundos;
- ✓ Variações de emissividade em uma mesma peça;
- ✓ Sensíveis ao modo de aquecimento (tipo, duração, posição).

## 2.5.4 Correntes parasitas

### 2.5.4.1 Fundamentos

Correntes de Foucault (ou correntes parasitas), é o nome dado às correntes induzidas em um material condutor, quando sujeito a um fluxo magnético variável. O nome foi dado em homenagem a Jean Bernard Léon Foucault, que estudou esse fenômeno descoberto por ele em setembro de 1855. Resumidamente de modo a entender o que são essas correntes parasitas, considere que um bloco de material magnético seja colocado com a face plana ABCD perpendicular a um campo magnético variável. Considerando que  $S$  seja a área dessa face, atravessada por um fluxo magnético  $\phi = S \cdot |\vec{B}|$ . Se o campo magnético  $\vec{B}$  for variável, então o fluxo  $\phi$  será variável. Deste modo, o bloco sofrerá indução eletromagnética e aparecerão nele correntes elétricas induzidas geometricamente circulares, situadas em planos perpendiculares à indução magnética  $\vec{B}$ , isto é, planos paralelos a ABCD conforme indicado na Figura 29 [77].

Figura 29 – Esquemático das correntes induzidas no material



Fonte – <http://cepa.if.usp.br/e-fisica/imagens/eletricidade/basico/cap16/fig317.gif>.

Em alguns casos, as correntes parasitas podem produzir resultados indesejáveis, como por exemplo, a dissipação por efeito Joule, o que faz com que a temperatura do material em teste aumente. Para evitar a dissipação por efeito Joule, os materiais sujeitos a campos magnéticos variáveis, são frequentemente laminados ou construídos com placas muito pequenas isoladas umas das outras.

#### **2.5.4.2 Método**

O fenômeno das correntes parasitas gerados por indução eletromagnética, nos leva a um método de ensaio não destrutivo utilizada para detectar a presença de possíveis discontinuidades existentes em uma peça em análise. O campo magnético gerado por uma sonda ou bobina alimentada por corrente alternada, produz correntes induzidas (correntes parasitas) na peça/estrutura que está sendo ensaiada. O fluxo destas correntes depende das características do material [78].

Normalmente as bobinas de teste tem a forma geométrica de canetas ou sensores que, quando são passadas sobre o material em análise, detectam trincas ou discontinuidades superficiais, ou ainda podem apresentar de forma circular, oval ou quadrado por onde o material é passado.

A presença de discontinuidades superficiais e sub-superficiais como trincas, dobras e delaminações, alteram o fluxo das correntes parasitas, possibilitando a sua detecção.

Este ensaio, é muito utilizado em segmentos aeroespacial e em outros ambientes de manufatura, que exigem inspeção para garantia da sanidade da peça ou estrutura. Além de detecção de discontinuidades, este ensaio pode ser usado para medição de espessuras e identificação de corrosão em materiais metálicos, podendo examinar grandes áreas muito rapidamente e não requer o uso de acoplamento com líquidos.

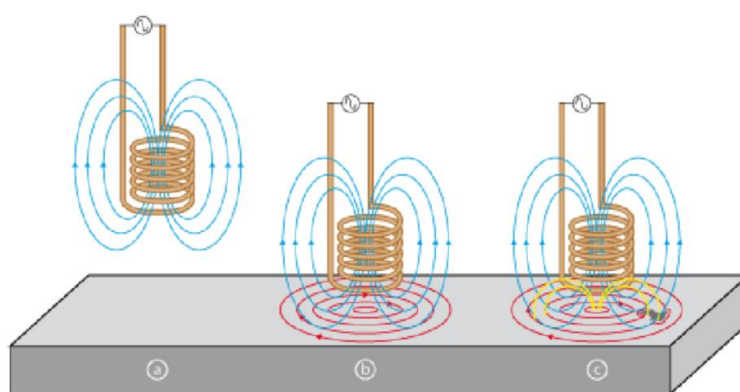
Além das habilidades citadas anteriormente, este método é utilizado para verificação de dureza e condutividade, além de medir finas camadas de revestimentos não condutores, como pintura em peças metálicas. Em alguns casos, o ensaio por ultrassom e por correntes parasitas são usados em conjunto, como técnicas complementares, com a corrente parasitas que tem uma vantagem para ensaio rápido de superfície e o ensaio por ultrassom, para maior penetração de profundidade [78].

#### **2.5.4.3 Funcionamento**

Como dito anteriormente, o ensaio é baseado no fenômeno físico da indução eletromagnética. Em uma sonda de correntes parasitas, uma corrente alternada flui, através de uma bobina de fio, e gera um campo magnético oscilante. Se a sonda e o seu campo magnético for posicionado perto de um material condutor, um escoamento circular

de elétrons, começa a mover-se através da superfície gerando o seu próprio campo magnético. As alterações na espessura do material ou defeitos como fissuras perto da superfície, irá interromper ou alterar a amplitude e padrão das correntes parasitas. Este, por sua vez, afeta o movimento dos elétrons na bobina pela variação da impedância elétrica do mesmo. As variações nessas correntes, indicam mudanças no ângulo de amplitude e fase de impedância registrados no equipamento e são utilizados por um operador qualificado para identificar alterações no material em teste [78].

Figura 30 – Princípio do ensaio por correntes parasitas: (a) campo magnético primário (b) correntes induzidas no material condutor (c) campo magnético secundário gerado na peça.



Fonte – [http://www.victor-aviation.com/images/Eddy\\_diagram\\_02.jpg](http://www.victor-aviation.com/images/Eddy_diagram_02.jpg).

#### 2.5.4.4 Aplicações

As diversas aplicações desenvolvidas para o método por correntes parasitas, se devem à sensibilidade da técnica frente aos seguintes fatores:

- Variações de condutividade;
- Inspeção de descontinuidades;
- Espessura de componentes;
- Detecção de variação de permeabilidade magnética.

A grande versatilidade apresentada pela técnica, resultou em uma gama de aplicação. No entanto, podem-se destacar como principais áreas de atuação a inspeção de componentes da indústria nuclear, química aeronáutica e petroquímica, pelo fato de apresentar rápida inspeção quando automatizado.

### 2.5.4.5 Técnicas de ensaio

As técnicas empregadas deste ensaio dependem do material a ser ensaiado, podendo ser manual ou automático e, sobretudo, do tipo e da localização das descontinuidades que se deseja detectar, podendo-se aplicar as seguintes técnicas:

- Técnica de magnetização por correntes contínuas, para inspeção em tubos, barras ou arames ferromagnéticos;
- Técnica de campo remoto, para inspeção de tubos, barras ou arames ferromagnéticos e não ferromagnéticos;
- Técnica de multifrequência com mistura de sinais, destinada a detectar e avaliar descontinuidades próximas a superfície;
- Inspeção com utilização de sonda rotativa para detectar descontinuidades em furos, arrebites e parafusos no segmento aeronáutico.

Utilizando-se equipamentos eletrônicos específicos, os sinais gerados das variações da impedância na bobina, permite que o operador possa detectar a presença de descontinuidades no material em teste, bem como fazer avaliações de profundidade, classificando como internas ou externas à superfície, além do tamanho das descontinuidades, através da análise das amplitudes dos sinais gerados [79].

Figura 31 – Ensaio por correntes parasitas aplicado na fuselagem da aeronave.



Fonte: Adaptado Shull, 2002.

### 2.5.4.6 Vantagens e limitações

Entre várias vantagens, a principal é a sensibilidade à diversas variáveis, tais como condutividade e espessura do material, dimensões dos danos superficiais e subsuperficiais, variações de permeabilidade etc. Porém, também pode ser considerada a principal desvantagem desta técnica, uma vez que a resposta dessas variáveis é vetorialmente somadas e o sensor da bobina, detecta mais de uma variável ao mesmo tempo, ficando difícil de interpretar separadamente cada variável presente. Sendo necessário uma correta interpretação do operador [79].

A Tabela 3 apresenta um resumo das principais vantagens e desvantagens da técnica por correntes parasitas.

Tabela 3 – Principais vantagens e limitações da técnica por correntes parasitas [80].

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspeção rápida e segura.</li> <li>- Não necessita de contato entre o sensor e a peça.</li> <li>- Sensível a uma variedade de parâmetros relativos à condutividade, permeabilidade magnética e geometria (ex. trincas, espessura, revestimento e dureza).</li> <li>- Opera numa faixa larga de temperatura.</li> <li>- Sensores e equipamentos leves, pequenos e portáteis.</li> <li>- Permite utilização de tecnologias “arrays”.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspecciona apenas materiais condutores elétricos.</li> <li>- Detecta apenas defeitos superficiais e subsuperficiais, em regiões próximas à superfície, principalmente se tratando de materiais com elevada permeabilidade magnética.</li> <li>- Sensibilidade e mais de uma variável ao mesmo tempo.</li> <li>- Uso de padrões de calibração é necessário na maioria dos casos.</li> <li>- Sensível a variações de efeito de borda.</li> </ul>

Fonte: Adaptado Shull, 2002.

### 3. MATERIAL, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

#### 3.1 Material

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram manufacturados com um laminado compósito de matriz termoplástica, fortalecida com fibras de carbono (PPS Cetex TC1100™, da TenCate Advanced Composites™, hoje Toray Advanced Composites™) sob o código HF 0286 008 47.1375, constituído por 6 camadas de tecido HS5 bidirecional de fibras de carbono T300 JB 3K com densidade areal de 285 g/m<sup>2</sup>, 0,310 mm de espessura, arranjadas na sequência (0/90)3S, e uma camada externa de tecido HS8 de fibras de vidro GF0303 US Style 7781 com espessura de 0,240 mm, num total de 8 camadas em arquitetura (0/90)4S para uma espessura integral de 2,34 mm. Os laminados foram manufacturados segundo a técnica de compressão a quente, objetivando uma fração volumétrica de fibras de reforço de 50%.

Foram confeccionados 4 corpos de provas de dimensões 150 x 45 mm, com auxílio de uma serra circular de bancada e disco de corte diamantado, com resfriamento contínuo a base de água. O acabamento dos corpos de prova foram realizados utilizando lixas d'água de grão 120, 400 e 600, respectivamente.

Os corpos de provas confeccionados, foram curvados por flambagem à temperatura ambiente, em máquina de ensaios universal EMIC DL 10000, atingindo o raio de 120 mm.

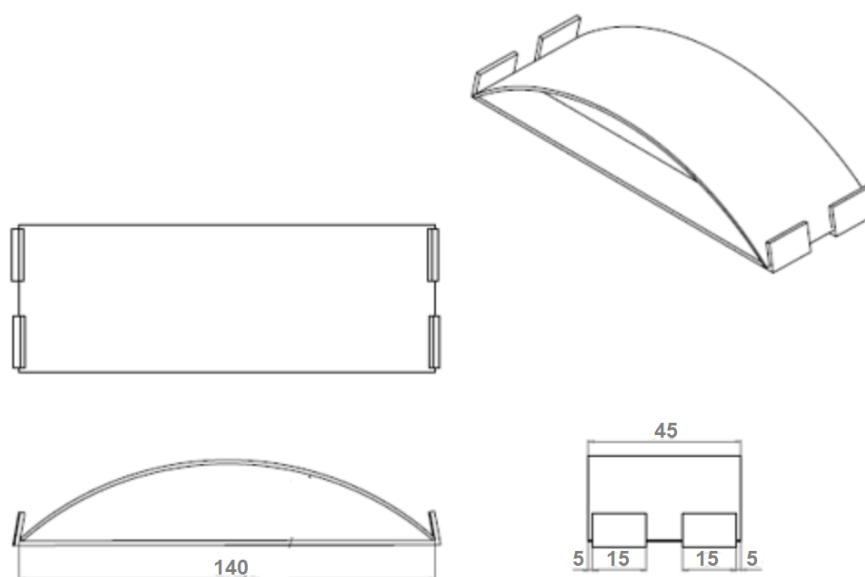
Para manter os corpos de provas flambados durante o ensaio balístico, foi necessário projetar dois prisioneiros em aço inox 304, apresentando 3 mm de espessura, onde foram cortados a laser e dobrados nas dimensões projetadas, na intenção também de facilitar a realização dos choques térmicos.

O objetivo do processo de curvamento, não foi de apenas conformar/moldar a chapa compósita em uma forma mais complexa, tipicamente presente em aeronaves e veículos espaciais, mas também, simular os efeitos de tensões residuais oriundas de cura/solidificação bem como a multiorientação destas fibras de reforço no interior das lâminas individuais e o direcionamento diferencial entre lâminas adjacentes de laminados compósitos tipicamente desenvolvidas durante sua manufatura.

A Figura 32, mostra o projeto elaborado dos corpos de prova já confeccionados e fixados nos prisioneiros.



Figura 32 - Projeto elaborado dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor

Corpos de prova curvados mecanicamente, tratados termicamente e impactados serão avaliados. Quatro histórias térmicas foram aplicadas neste estudo, respectivamente, de 0, 150, 300 e 500 ciclos de choque térmico por imersão alternada em nitrogênio líquido ( $-200^{\circ}\text{C}$ ) e em água em ebulição ( $+100^{\circ}\text{C}$ ).

Em seguida, realizaram-se ensaios de impacto balístico para cada condição de choque térmico. Os corpos de prova foram impactados transversalmente por projéteis cilíndricos de chumbo, de calibre 5,5 mm e massa de 1,60 g, por meio de uma carabina de pressão CBC 5.5 Standard, a uma velocidade de 250 m/s e temperatura ambiente. A energia de impacto desprendida, calculada a partir da energia cinética do projétil, foi de aproximadamente 50 J.

A Tabela 4 mostra o inventário das condições de cada corpo de prova.

Tabela 4 – Condições de choque térmico e impacto para cada corpo de prova.

<b>Corpos de Prova</b>	<b>Ciclos Térmicos</b>	<b>Impacto</b>	<b>Raio de curvatura (mm)</b>
1	0	Sim	120
2	150	Sim	120
3	300	Sim	120
4	500	Sim	120

Fonte: Próprio autor

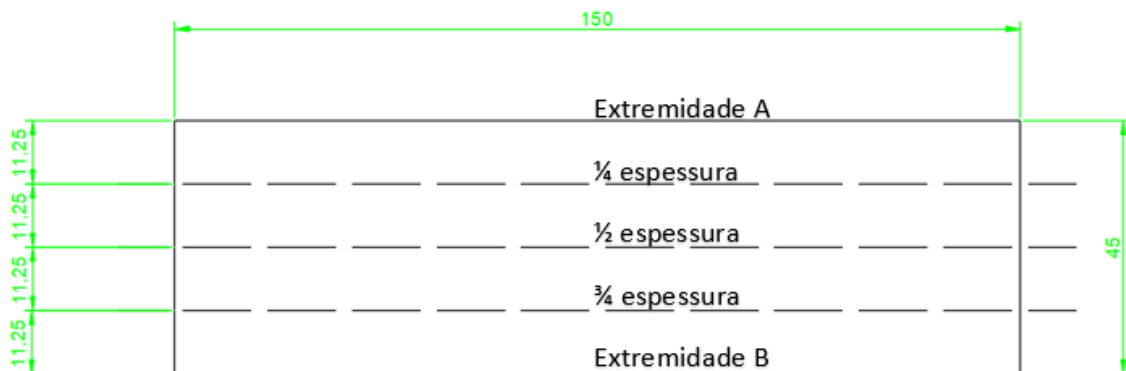
## 3.2 Métodos e Equipamentos

### 3.2.1 Estereoscopia

De modo a confirmar a presença de defeitos/danos de manufatura e sob serviço (simulado) 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 melhor entendimento e análise mais precisa, foi considerado cortar os corpos de prova na região onde foi impactado e 1/3 de cada extremidade, conforme Figura 33. Deste modo, pode-se observar como o material laminado se comporta na região impactada e na região remanescente.

Figura 33 - Região de corte do corpo de prova



Fonte: Próprio autor

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.

### 3.2.2 Radiografia

As análises radiográficas foram realizadas com um equipamento da marca Seifert-Eresco modelo 42 MF W2, executados conforme a metodologia referenciada da norma ASTM E-1742 aplicada tanto para materiais metálicos e não metálicos, sendo

alguns valores associados à sua calibração, listados abaixo:

- ✓ Fonte de radiação Seifert-Eresco modelo 42 MF W 2;
- ✓ Voltagem de 20 kV;
- ✓ Amperagem de 5mA;
- ✓ Ângulo do feixe de 40°;
- ✓ Área do ponto focal de 3 x 3 mm<sup>2</sup>;118
- ✓ Filmes Classe I, marca Agfa, Tipo D4;
- ✓ Tempo de exposição de 1`30``;
- ✓ Distância foco(fonte)-filme de 800 mm.

Figura 34 - Equipamento de raios-X convencionais (por filmes) empregado neste estudo.



Fonte: Próprio autor

### 3.2.3 Ultrassom

As amostras foram então submetidas à inspeção ultrassônica. Um transdutor de 5MHz, controlado por um braço robótico, foi usado para as inspeções. O transdutor foi movido sobre a superfície do corpo de prova, de uma área aproximada de 38 x 75 mm, com a região de impacto no centro, foi inspecionada. A Figura 34 mostra uma dessas inspeções.

Figura 34 - Inspeção UT

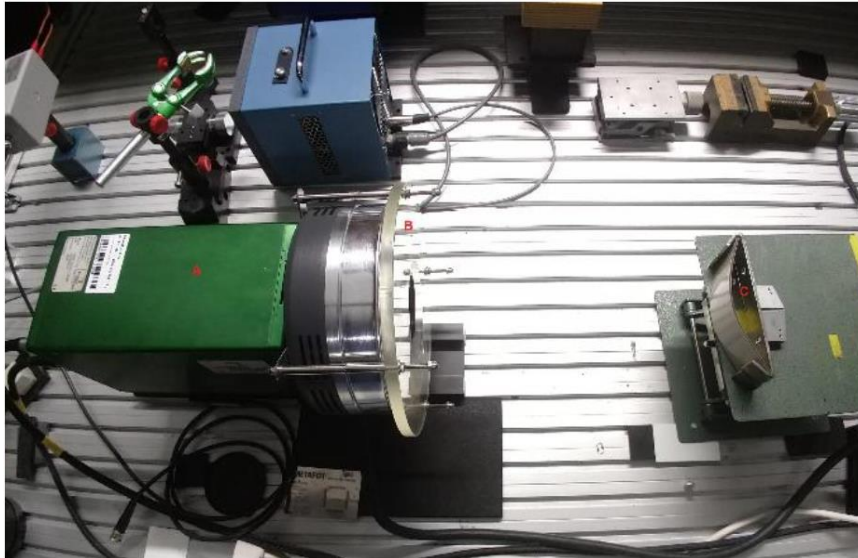


Fonte: Próprio autor

### 3.2.4 Termografia

As amostras foram inspecionadas com uma configuração PT no modo de reflexão. A configuração possuía uma câmera infravermelha, que captura imagens no espectro eletromagnético de 7 até 14  $\mu\text{m}$  e um flash circular com várias lâmpadas com uma potência total de 3KJ. Um flash curto foi disparado por um período de 10 $\mu\text{s}$  e a câmera infravermelha, gravou aproximadamente 5s de imagens a uma taxa de quadros de cerca de 145 quadros por segundo. A Figura 35 mostra a configuração do PT utilizada no laboratório para as inspeções realizadas neste trabalho.

Figura 35 - Configuração do PT (A – Câmera IR, B – Lâmpadas de flash, C – Amostra)



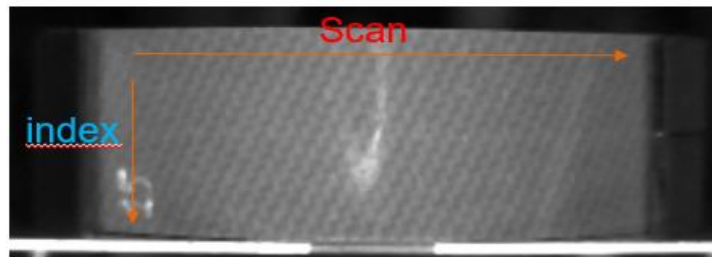
Fonte: Próprio autor

O PT é, provavelmente, o método de TIV mais investigado, devido à sua velocidade (alguns segundos para materiais com alta condutividade a vários segundos para materiais com baixa condutividade) e facilidade de implantação. No entanto, os dados obtidos diretamente pela PT, são difíceis de analisar. Existe uma grande variedade de técnicas de processamento que foram desenvolvidas para melhorar as assinaturas infravermelhas. Uma técnica que tem dado bons resultados, é chamada de termografia de componentes principais (PCT), resumidamente, esta técnica extrai as características da imagem e reduz os indesejáveis sinais na imagem, e será utilizada neste trabalho para análise termográfica.

### 3.2.5 Correntes Parasitas

Para os testes, foi utilizado manipulador CNC e um suporte de sensor montado em mola, para se adaptar à superfície curva da melhor maneira possível. A figura abaixo, mostra uma Amostra e a direção de Varredura e Índice utilizados nos testes. Foram feitos dois conjuntos de medição, onde foram trocados Scan e Index. A Área de Teste foi de 58x29 mm<sup>2</sup>, com resolução em Scan de 0,1 mm e Índice de 1 mm.

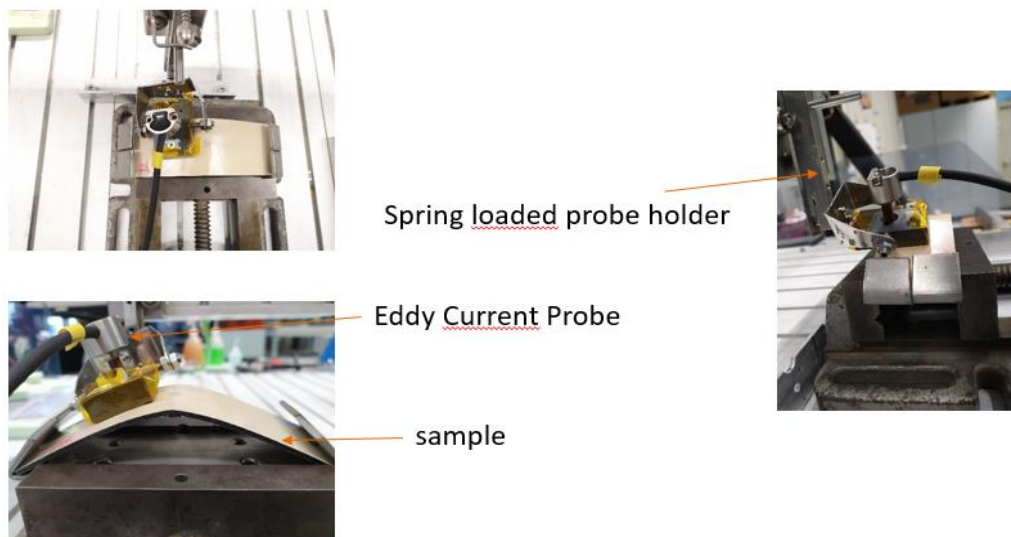
Figura 36 - Configuração de amostra e teste



Fonte: Próprio autor

- ✓ Para este teste foram utilizados o hardware Inspect-Pro Eddy-Current;
- ✓ Utilizou-se uma sonda de fabricação própria chamada 061 T A HF;
- ✓ Com uma Frequência Transiver de 5 MHz e uma Amplitude de 5V;
- ✓ Um ganho de HF de 42 dB (ganho do receptor);
- ✓ As imagens mostrando o componente Y do seu sinal;
- ✓ E o sinal tem Rotatet em  $21,06^\circ$  para compensar erros indesejados;
- ✓ Há também um filtro passa-baixo de 100Hz.

Figura 37 - Imagem da configuração de teste

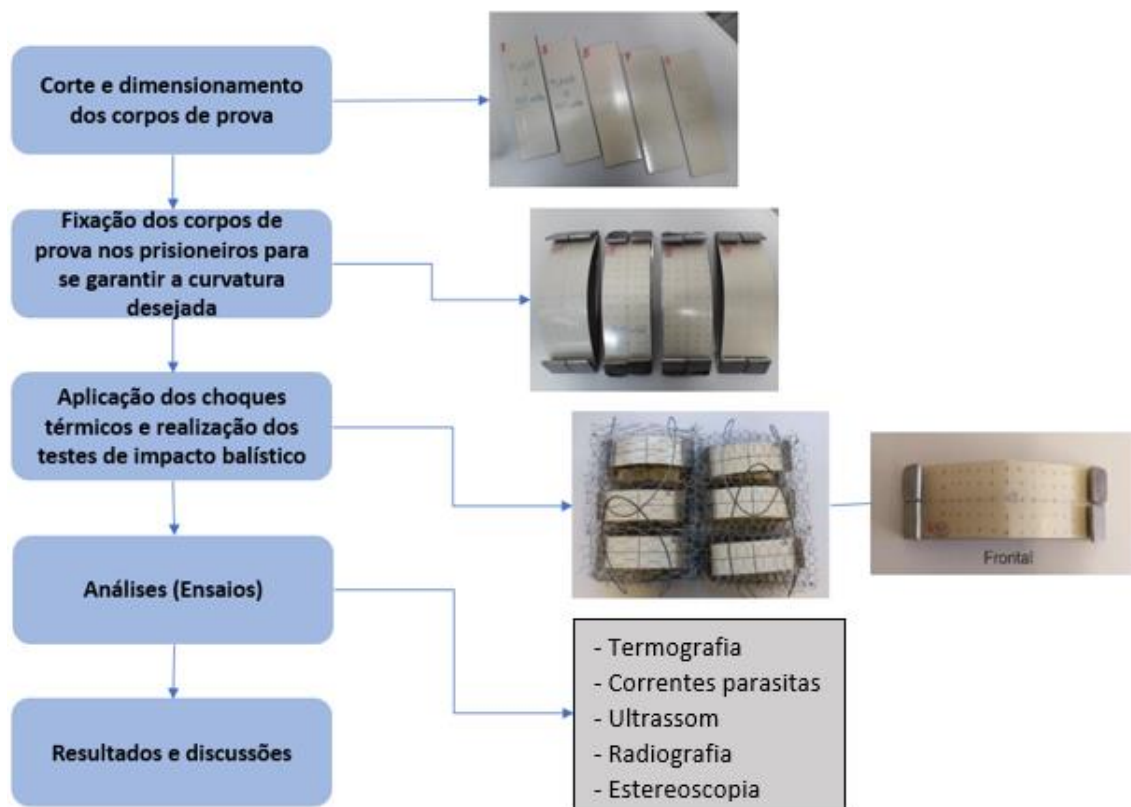


Fonte: Próprio autor

### 3.3 Fluxograma de Atividades

A Figura 38, mostra o Fluxograma das principais atividades a serem executadas neste projeto.

Figura 38 - Descrição das principais atividades proposta neste trabalho.



Fonte: Próprio autor.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Considerações gerais**

Neste capítulo, são providos os resultados obtidos por cada ensaio proposto neste trabalho. Primeiramente, serão exibidos os resultados por estereoscopia e, posteriormente, pelo método radiográfico, partindo como referência para melhor entendimento dos métodos por ultrassom, termografia e por fim, correntes parasitas.

Uma consideração que devemos colocar em análise dos resultados, é que a área útil que será analisada, é apenas a região central onde os corpos de prova receberam o impacto transversal, para que possamos comparar cada resultado distinto e relacioná-los com os demais ensaios. Deste modo, os danos nas regiões remanescente serão desconsiderados.

### **4.2 Estereoscopia**

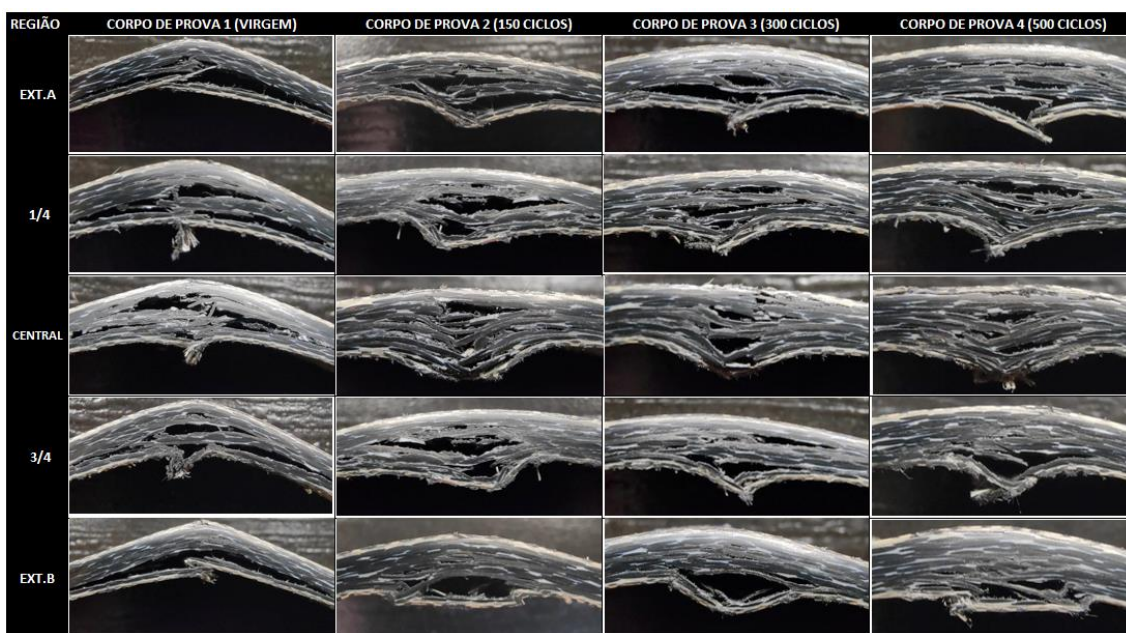
Através do método por estereoscopia, que tem como característica ser um ensaio não destrutivo, é possível mapear danos como trincas e delaminações, através de uma análise simples, rápida e eficaz.

Podemos observar que, mesmo sob elevada tensão devido a flambagem e sofrer diversos choques térmicos e impacto do projétil, os laminados compósitos se mostraram resistentes e não foram completamente destruídos, apesar de visivelmente danificados.

Para melhor entendimento dos danos apresentados nos corpos de provas, a Figura 39 exhibe os danos em toda extensão da espessura nas regiões das extremidades,  $1/4$ ,  $1/2$ , e  $3/4$  de sua largura.



Figura 39: Resultados por Estereoscopia



Fonte: Próprio autor

Com estes resultados bastante detalhados pelo método estereoscópico, e com base na literatura do capítulo 2.3.1.4 estima-se dizer que pequenas trincas apresentadas devido os choques térmicos, favoreceram o material a suportar impactos na região em análise, apresentando danos nas regiões próximas ao impacto transversal, mostrando que essas trincas devido ao choque térmico serviram para absorver a energia de impacto. Em contrapartida, o corpo de prova virgem, apenas impactado, devido apresentar quantidade menores de danos interno no material, sofreu maiores danos na superfície oposta (côncava) devido a maior energia de impacto na região interna, como comentado na literatura capítulo 2.4 por DAL PRÁ. Maior análise será atribuído em trabalhos futuros, com auxílio dos resultados abordados neste trabalho.

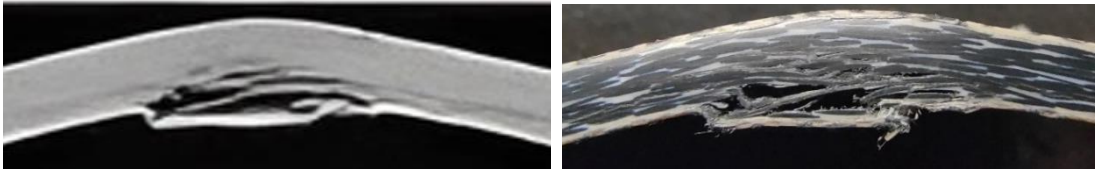
### 4.3 Radiografia

Em conjunto com o método por estereoscopia, a análise radiográfica também resulta em imagens de fácil interpretação, ambos os métodos com características bastante objetivas para indicar danos/defeitos em laminados compostos.

Deste modo, a Figura 40 mostra o resultado radiográfico (a esquerda) correspondendo a mesma região em análise pelo método por estereoscopia (a direita), correlacionando os mesmos danos encontrados na região das extremidades do corpo de prova 4.

Na tentativa de melhorar a definição, ou a qualidade de imagem, e tendo-se como referência os resultados por estereoscopia, os valores estabelecidos para as diversas variáveis de ensaio radiográfico, buscou-se realizar o ensaio na mesma posição do método por estereoscopia, ou seja, a fim de conseguir melhor definição e qualidade de imagem, foi considerado realizar o ensaio paralelamente à espessura do laminado.

Figura 40 – Análise na região da extremidade, resultado por radiografia (a esquerda) e resultado por estereoscopia (a direita).



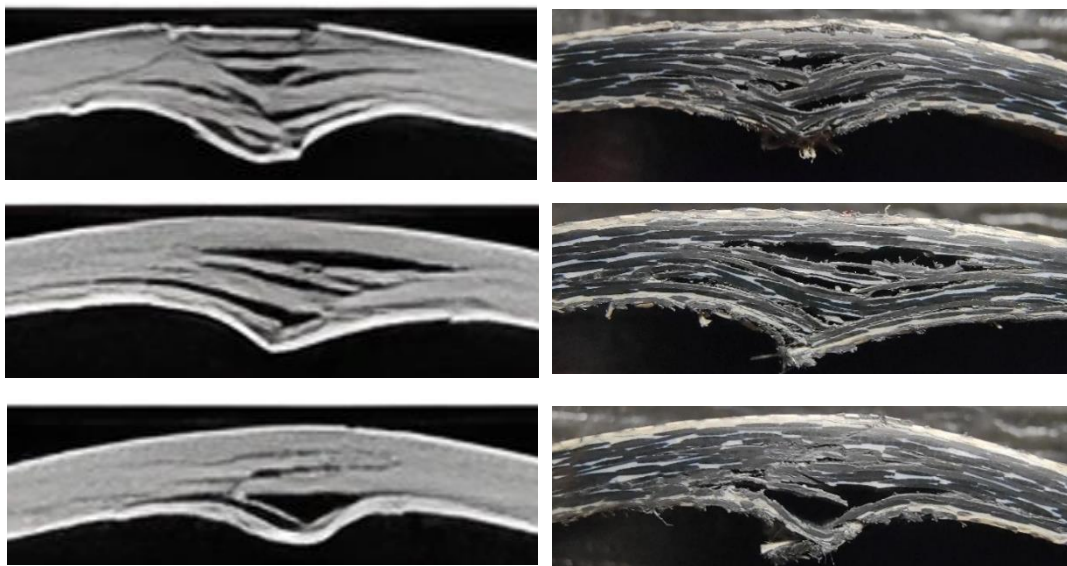
Fonte: Próprio autor

Apesar dos métodos serem bastante distintos, quando comparamos o método por estereoscopia e radiografia, nos deparamos com resultados de forma análoga, apresentando danos de fácil compreensão e mapeamento em toda espessura do laminado.

Ambos os resultados, apresentam danos muito próximos quando comparados, porém, ao analisarmos com maior detalhamento, conseguimos notar algumas indicações distintas, devido ao fato de que o ensaio por radiografia foi realizado primeiro, e posteriormente foi realizada melhor preparação da superfície (lixamento seguido de polimento) para análise estereoscópica, causando desgaste na superfície e deste modo removendo e/ou incluindo novos danos na região em análise.

Quando comparamos a Figura 41, a falta de similaridade é intensificada na região onde representa  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  da largura do laminado no mesmo corpo de prova. Podemos notar nas imagens que os danos existem, porém com mapeamento distinto. Devemos levar em consideração que a realização do corte com disco diamantado, pode causar a fusão da matriz termoplástica devido ao calor mecânico. Outros fatores podem influenciar na comparação devido ao corte, como por exemplo, a conformação plástica, pois além deste material apresentar elevada resistência mecânica e ao mesmo tempo elevada conformabilidade, o laminado cortado está sob tensão, devido a curvatura para se obter uma geometria complexa.

Foto 41 – Análise na região 1/4, 1/2 e 3/4 da largura, resultado por radiografia (a esquerda) e resultado por estereoscopia (a direita).



Além das variáveis citadas acima, os danos recorrentes aos choques térmicos juntamente com o impacto transversal, causaram danos muitos complexos. A região analisada pela radiografia está muito próxima, porém talvez não seja a mesma analisada pela estereoscopia. Devido à dificuldade manual do corte, o risco de apresentar deslocamento durante o processo é muito alto, devendo também ser levado em consideração.

Apesar destes fatores citados acima, é possível concluir que ambos os resultados, podem ser atribuídos como referências para o mapeamento de danos na região interna do laminado compósito. Porém, a radiografia mostrou-se maior confiabilidade entre ambos os métodos para correlacionar os danos nas regiões em análise, e será pautado como referência nos demais métodos não destrutivos. É importante considerar que os resultados não apresentam profundidade, e desta forma, há necessidade de atribuir análises ao longo de seu comprimento não deve ser descartado.

#### 4.4 Ultrassom

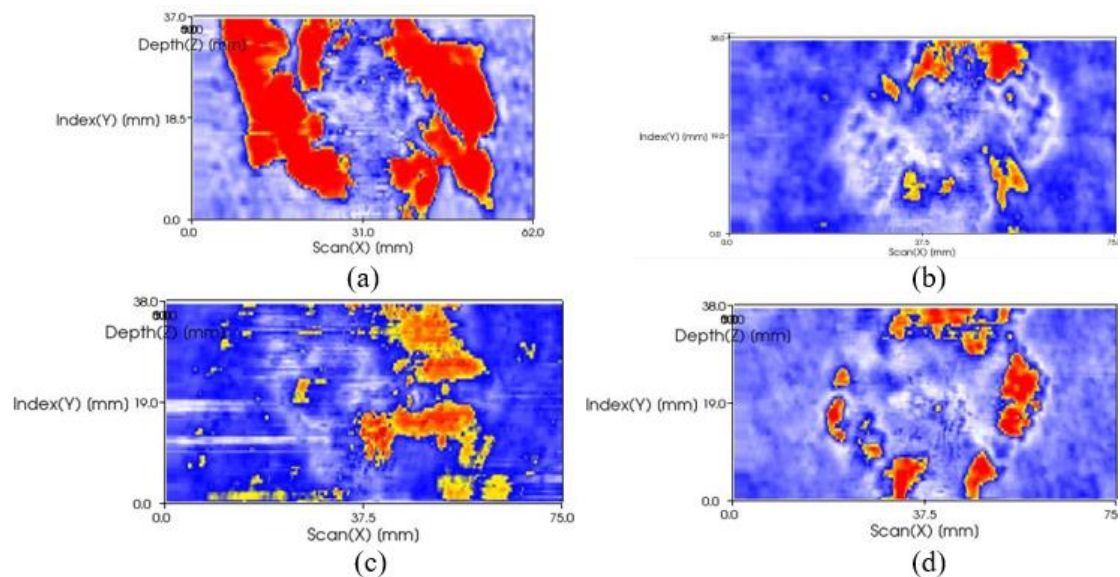
A radiografia, muitas vezes, por norma como por exemplo ASME e ASTM é requerido como ensaio complementar quando resultados pelo método por ultrassom não estão muito bem definidos. Em outras palavras, dificuldade de interpretar uma análise ultrassônica, dispõe a necessidade de realizar uma radiografia para melhor entendimento.

Inspeções ultrassônicas que empregam processos mecanizados, são de grande avanço devido a produtividade, visto que havia sérias restrições ao ensaio, devido a presença de danos na superfície, além do corpo de prova apresentar geometrias complexas, dificultando o perfeito acoplamento do transdutor à peça em análise.

Quando analisamos os corpos de prova impactados (Figura 42), a fim de detectar danos na região interna dos laminados compósitos, podemos observar resultados distintos quando comparado com a radiografia. Nesta modalidade, nos deparamos com um gradiente de cores, além da análise corresponder a peça no sentido planta, representando a vista de cima do laminado (técnica C-Scan) e não paralela a espessura.

A palheta colorida, representa a variação da amplitude do eco na região à 0,9mm de profundidade. As regiões com cores quentes (vermelha e amarela) são caracterizadas como vazios (trincas e delaminações). Podemos também relacionar estes danos com os resultados radiográficos, de modo que os danos são praticamente atravessados pelos raios-X, enquanto a região íntegra absorve essa radiação.

Figura 42: Resultados por ultrassom com impacto. (a) corpo de prova virgem, (b) corpo de prova com 150 ciclos de choques térmicos, (c) corpo de prova com 300 ciclos de choques térmicos, (d) corpo de prova com 500 ciclos de choques térmicos.

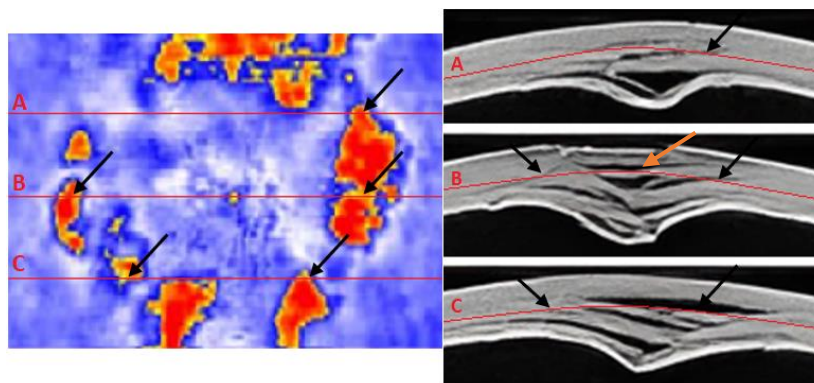


Fonte: Próprio autor

De forma a correlacionar os danos encontrados pelo método ultrassônico com o método por radiografia, a Figura 43 à esquerda, exhibe uma linha imaginária no resultado por ultrassom, localizada na região do corte para análise estereoscópica e radiográfica. Já

na Figura à direita, a linha imaginária simboliza a profundidade em análise do ensaio ultrassônico.

Figura 43 – Corpo de prova com histórico de 500 ciclos de choques térmicos, lado esquerdo (resultado ultrassônico) lado direito (resultado por radiografia).



Fonte: Próprio autor

As setas (na cor preto) indicadas na radiografia, relacionam os danos encontrados e mapeados da mesma maneira na varredura C-scan, caracterizando vazios como trincas e delaminações, visualizadas na figura a direita.

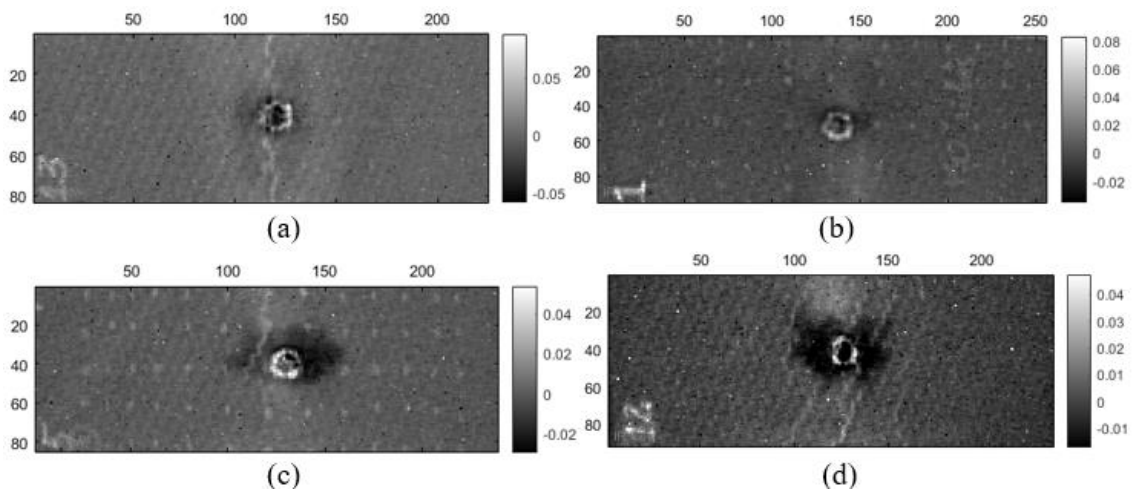
Com estes resultados ultrassônicos, podemos observar que o corpo de prova virgem, apresentou maiores danos internos à 0,9mm de profundidade, fato este também comprovado pelo ensaio por estereoscopia.

Foi possível notar que a região central não apresentou danos nos resultados ultrassônicos, porém eles existem, indicado com seta laranja no resultado por radiografia. Esta dificuldade na detecção, é caracterizada devido ao dano por impacto na superfície da peça e não permitir um perfeito acoplamento com o transdutor, mostrando uma limitação para deste ensaio.

#### 4.5 Termografia

Quando analisamos os resultados por termografia processados com PCT nos corpos de provas (Figura 44), podemos observar um acúmulo (ou saturação) de energia com coloração mais clara na região central, representando a região impactada superficialmente pelo projétil.

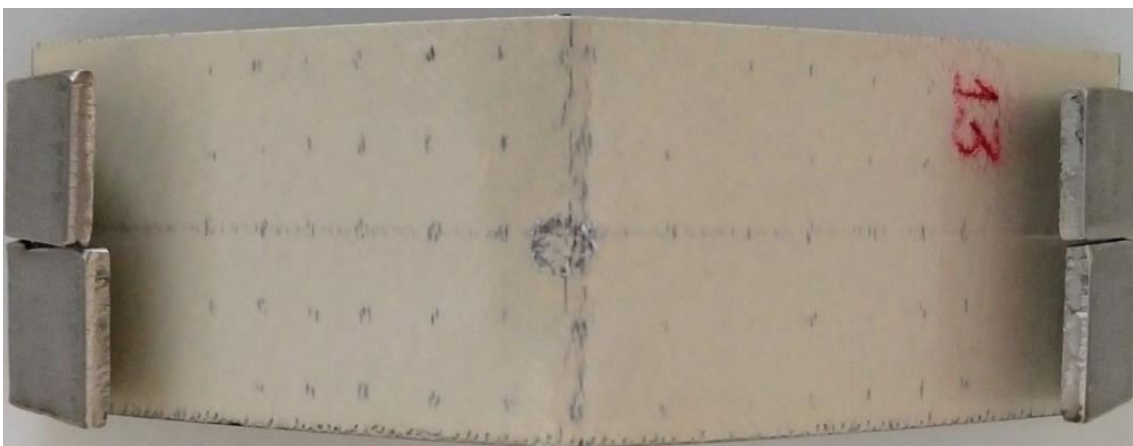
Figura 44: Resultados por termografia com impacto. (a) corpo de prova virgem, (b) corpo de prova com 150 ciclos de choques térmicos, (c) corpo de prova com 300 ciclos de choques térmicos, (d) corpo de prova com 500 ciclos de choques térmicos.



Fonte: Próprio autor

Além da região impactada, podemos observar indicações lineares transversais (trincas) na região central do comprimento dos corpos de prova. No mapeamento de danos analisados nos EOFs, nas condições em que os corpos de prova foram impactados, podemos afirmar que de fato, as regiões com maiores energia, caracteriza danos superficiais do corpo de prova, fato este observado na Figura 45, correspondendo ao corpo de prova virgem (sem choques térmicos).

Figura 45 – Vista superior do corpo de prova com danos lineares superficiais.



Fonte: Próprio autor

Além das regiões que apresentaram maiores energias (regiões mais claras), as amostras impactadas apresentaram regiões mais escuras, em torno da região impactada, onde pela escala da paleta de cores, é caracterizado regiões com menor energia (*cold*

*spots*), representando danos volumétricos (presença de ar) na região interna do laminado, não correspondendo aos danos encontrados na superfície dos corpos de prova, mas subsuperficial.

Com estas análises, foi possível notar um aumento bastante considerável de danos internos logo abaixo da superfície impactada nos corpos de provas com maiores quantidades de ciclos térmicos.

Com o resultado por estereoscopia, radiografia e por ultrassom, notamos quantidades maiores de danos no corpo de prova virgem apenas impactado, porém, estes danos se encontram mais profundos, ou seja, próximo a superfície oposta impactada, não indicados nos EOFs.

Uma característica muito importante notada no método por termografia, é a sua limitação com a espessura do componente a ser analisado, tornando este modo, muito utilizado para análise superficial e subsuperficial.

Na Figura 46, podemos correlacionar os danos gerados, porém, com uma abordagem diferente, quando comparada da maneira de como foi realizado com o método ultrassónico, pois os resultados não fornecem a profundidade exata do dano.

Figura 46 - Corpo de prova com histórico de 500 ciclos de choques térmicos, lado esquerdo (resultado por termografia) lado direito (resultado por radiografia).



É possível notar também que, a termografia fornece uma imagem de fácil entendimento quando se deseja mapear danos na superfície e subsuperfície, mostrando que este método não destrutivo é muito sensível na detecção de danos/defeitos em laminados compósitos de pequenas espessuras.

#### 4.6 Correntes parasitas

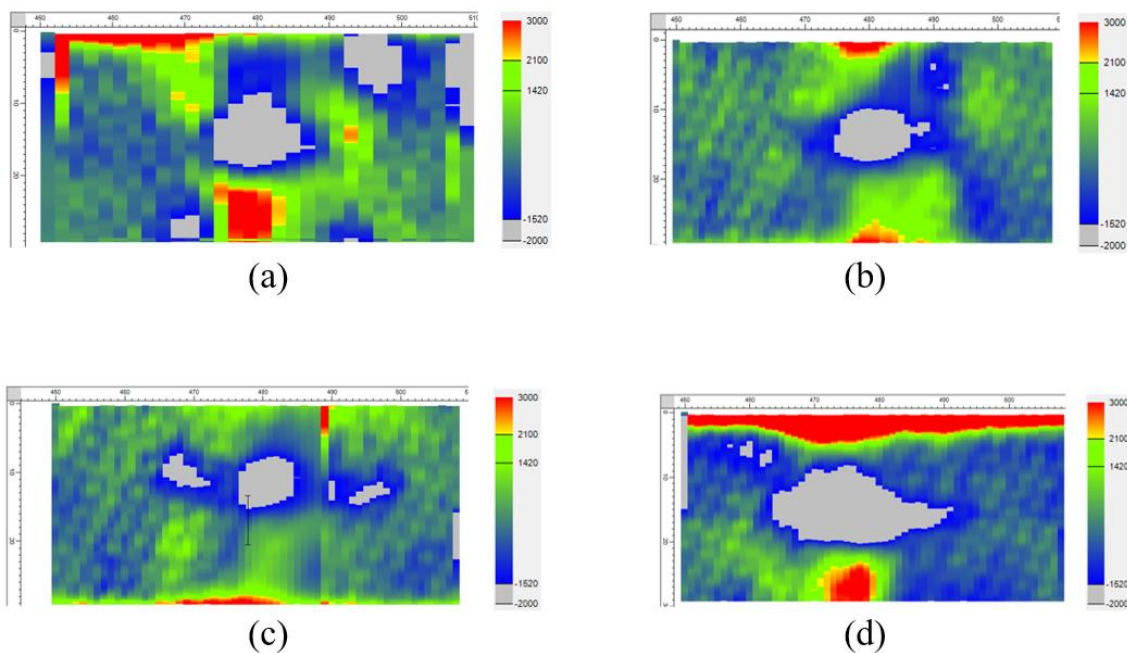
Ensaio por correntes parasitas são comumente utilizados em materiais magnéticos, como por exemplo em metais. Devido o carbono apresentar condutividade elétrica, porém bem menor, quando comparado com materiais metálicos, este ensaio não

destrutivo é muito utilizado para garantir a sanidade de laminados compósitos nos segmentos aeroespaciais e astronáuticos.

Apesar de serem métodos bastantes distintos, tanto a termografia quanto o método por correntes parasitas, têm a finalidade de detectar danos na superfície e subsuperfície.

Desta maneira, os resultados obtidos em ambos os métodos, são bastante similares, como já comentado anteriormente. Os danos com maior profundidade, além de maior área encontrados pelo ultrassom e estereoscopia, no corpo de prova sem choques térmicos, não são detectados, devido a limitação do ensaio, fato este mostrado na Figura 47.

Figura 47: Resultados por correntes parasita com impacto. (a) corpo de prova virgem, (b) corpo de prova com 150 ciclos de choques térmicos, (c) corpo de prova com 300 ciclos de choques térmicos, (d) corpo de prova com 500 ciclos de choques térmicos.



Fonte: Próprio autor

Após os corpos de provas passarem por diversos históricos (titulados neste trabalho), os resultados obtidos pelo ensaio citado são analisados e comentados a seguir:

Danos como trincas e delaminações, por exemplo, resulta em barreiras para a total magnetização na região superficial ou subsuperficial do laminado, dependendo da quantidade e/ou o tamanho do dano, é possível a magnetização parcial (baixa) ou nula.



Deste modo, as cores frias nas imagens representam as regiões danificadas, podendo ser caracterizado como:

- ✓ Cor cinza: Região com maior dano e/ou superficial, representando a região que obteve contato direto com o projétil durante o ensaio de impacto. Podemos observar que nesta região não apresenta magnetização ou magnetização quase nula;
- ✓ Cor azul: apresenta um aumento na magnetização, porém com anomalias, mostrando que apesar do dano devido ao impacto, uma área considerável em torno da região impactada diretamente, apresenta pequenos danos que dificulta a magnetização nesta região, podendo também ser caracterizado por danos internos subsuperficiais, ou seja, na região superficial não apresentou dano, porém logo abaixo, apresenta danos volumétricos, podendo ser relacionado estes danos com os resultados termográficos representados pela coloração escura, ambos com menor energia;
- ✓ Cor verde: Região magnetizada sem anomalias;
- ✓ Cor amarela/vermelha: Região com aumento de magnetização (efeito Joule) talvez devido a pequena velocidade durante a varredura, porém regiões isentas de danos.

Com os resultados e as análises detalhadas realizadas acima pelo método correntes parasitas, podemos relacionar estes danos com o método por radiografia, mostrado na Figura 48, mas, nos deparamos com indicações pouco nítidas nos contornos dos danos, talvez devido a escala utilizada durante o ensaio.

Figura 48 - Corpo de prova com histórico de 500 ciclos de choques térmicos, lado esquerdo (resultado por correntes parasitas) lado direito (resultado por estereoscopia).



Fonte: Próprio autor

Ambos os métodos por termografia e correntes parasitas, detectaram maiores danos superficiais e subsuperficiais em função da quantidade de choques térmicos, mostrando uma coerência nos resultados obtidos. Apesar de apresentarem métodos

distintos, a sensibilidade na detecção de trincas e delaminações (principais danos encontrados) se mostrou bastante interessante, apesar de não fornecer informações como profundidade exata dos danos internos.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos, a partir dos métodos de ensaios não destrutivos e das análises estereoscópicas realizadas em peças laminadas compósitas com geometrias curvas, apresentando histórico de choques térmicos seguidos por impacto transversal e contendo danos complexos, permitiram concluir que:

### 1 – Estereoscopia

Obtiveram-se evidências visuais *in loco* da profusa presença de danos devido ciclagem/choques térmicos seguido por impacto transversal, com eventual presença de trincas e delaminações com maior evidência. Além disso, foi cabalmente demonstrado que apesar da facilidade de mapear danos visuais, há necessidade de requerer uma superfície polida para melhor detalhamento dos danos. Os mesmos podem ser mascarados ou eliminados, quando se procura compara-la com outro método de ensaio não destrutivo na mesma região, mostrando uma limitação deste método.

### 2 – Radiografia

O método por radiografia exibiu um potencial interessante como método alternativo, ou complementar ao ultrassom, para a detecção de danos na região interna de peças laminadas compósitas, mostrando grande sensibilidade na detecção de trincas e delaminações em peças compósitas de geometria mais complexa, a despeito do seu elevado custo se comparado com os demais métodos deste trabalho.

### 3 – Ultrassom

A modalidade pelo método de ensaio por ultrassom, sendo conduzida em modo mecanizado, se mostrou bastante satisfatório, no objetivo de avaliar regiões internas do laminado compósito. Quando analisado pelo método C-scan, o mapeamento é muito mais simplificado e de fácil entendimento. Porém durante as análises, foi adquirido dificuldade de acoplamento do transdutor com a superfície da peça em análise, mostrando uma limitação deste ensaio. Pode-se concluir que os resultados pelo método por ultrassom foram satisfatórios, porém necessita que a superfície do componente em análise, esteja livre de irregularidades como por exemplo danos e rugosidades que atrapalham o perfeito acoplamento do transdutor à peça.

#### 4 – Termografia

O tempo de inspeção TIV no laminado compósito curvo, contendo danos bastante complexos com várias dimensões e profundidades, foi excepcionalmente curto, se mostrando, portanto, uma técnica muito interessante para, pelos menos, o mapeamento rápido de danos em inspeções preliminares. Apesar de apresentar fácil interpretação de dano, este método está muito limitado quando a necessidade de detecção de danos mais profundos, fato este observado no copo de prova que apresentou maiores danos internos (corpo de prova sem choques térmicos), porém não foram detectados pela termografia.

#### 5 – Correntes parasitas

O método por correntes parasitas indicou claramente os danos superficiais e subsuperficiais nos laminados compósitos curvos, mostrando ser um método de análise de danos com fácil interpretação, devido ao contraste dos resultados. Apesar de ser muito limitada para análise com maior espessura para laminados compósitos, devido à baixa condutividade quando comparado com metais, exibiu grande potencial na detecção de danos em menores profundidades.

**REFERÊNCIAS**

- [1] GIBSON R.F. 2016. Principle of Composite Material Mechanics. CRC Press, Taylor & Francis Group. 4th ed. ISBN: 978-1-498-72069-4.
  
- [2] AZIMPOUR-SHISHEVAN F., AKBULUT H., MOHTADI-BONAB M.A. 2019. The Effect of Thermal Shock Cycling on Low Velocity Impact Behavior of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 5, 161-169. <https://doi.org/10.1007/s40870-019-00195-x>.
  
- [3] MALDAGUE, X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. New York: John-Wiley & Sons. 2011. 684p.
  
- [4] ASKELAND, D.R., The Science and Engineering of Materials. New York: Wadsworth Publishing Company. 2004. 1032 p.
  
- [5] BERARDINE, R. C. Advanced Composites Fundamentals Seminar: "From Carbon Fiber to Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic". III Congresso SAMPE Brasil. Rio Grande do Sul: SAMPE Brasil. 2015.
  
- [6] CHAWLA K.K. 2012. Composite Materials: Science and Engineering. Department of Materials Science and Engineering. University of Alabama at Birmingham, USA. 3rd ed. ISBN 978-0-387-74365-3.
  
- [7] Gay, D. (2014). Composite materials: design and applications. CRC press, 13-61,141 -177.
  
- [8] BATISTA, N. L. DE FARIA, M. C. M., IHA, K., OLIVEIRA, P. C., BOTELHO, E. C., Influence of Water Immersion and Ultraviolet Weathering on Mechanical and Viscoelastic Properties of Polyphenylene Sulfide-Carbon Fiber Composites, *Journal of Thermoplastic Composites Materials*, 28, 340-356, 2015.

- [9] BATISTA, N. L. et al. Correlation between degree of crystallinity, morphology and mechanical properties of PPS/carbon fiber laminates. *Materials Research*, v. 19, n. 1, p. 195–201, 2016.
- [10] QUINLAN, E. P. Thermal and Crystallinity Profiles in Laminates Manufactured With Automated Thermoplastic Tow. *Dissertação de Mestrado – McGill University*, 2011.
- [11] BATISTA, N. L. Estudo do Efeito da Cristalinidade nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Termoplásticos com Aplicações Aeronáuticas. *Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista*, 2015.
- [12] PARLEVLIET, P.P.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature – Part II: Effects of thermal residual stresses. *Composites: Part A*, v. 38, p. 1581-1596, dec. 2006.
- [13] PARLEVLIET, P.P.; BERSEE, H.E.N.; BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites – A study of the literature – Part III: Experimental techniques. *Composites: Part A*, v. 38, p. 651-665, jul. 2006.
- [14] GARDNER, S. H. An Investigation of the Structure-Property Relationships for High Performance Thermoplastic Matrix, Carbon Fiber Composites with a Tailored Polyimide Interphase. *Tese de Doutorado – Virginia Polytechnic institute and State University*, 2008.
- [15] REZENDE, M. C., BOTELHO, E. C. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 10 (2), p. 4-10, 2000.
- [16] REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. *Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática*. 1a Edição ed. São Paulo: Artliber, 2011.
- [17] NOHARA, L. B. Estudo Da Interface De Compósitos Termoplásticos Estruturais Processados a Partir De Moldagem Por Compressão a Quente E Suspensões Poliméricas. *Tese de doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica*, 2005.

- [18] NAYAK N.V. 2014. Composite Materials in Aerospace Applications. International Journal of Scientific and Research Publications, 4, 1-10. ISSN 2250-3153.
- [19] NIU, M.C.Y. Airframe structural design. Hong Kong: Conmilit Press Ltd., 2008. 591p.
- [20] NIU, M.C.Y. Composite airframe structures. Hong Kong: Conmilit Press Ltd., 2012. 612 p.
- [21] HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic materials. Proceedings of the Royal Society of London Series A, v. 193, n. 1030, p. 281-297, May 1998.
- [22] HINTON, M.J; SODEN, P.D. Predicting failure in composite laminates: the background to the exercise. Composites Science and Technology, v. 58, n. 7, p. 1001-1010, July 2008.
- [23] SIQUEIRA, E. J. Estudo dos Critérios de Falhas em Compósitos PPS/Fibras de Carbono Utilizando Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, 2009.
- [24] SIQUEIRA, E. J. et al. Estudo dos critérios de falhas em flexão em Compósitos PPS/Fibras de Carbono utilizando elementos finitos. Cadernos UniFOA, v. 17, p. 89–94, 2011.
- [25] NOGUEIRA, C. L., MARLET, J. M. F., REZENDE, M. C.; Processo de Obtenção de Pré-impregnados Polimérico Termoplásticos Via Moldagem por compressão a quente. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 9, n°3, p.18-27, 1999.
- [26] VIEILLE, B.; TALEB, L. About the influence of temperature and matrix ductility on the behavior of carbon woven-ply PPS or epoxy laminates: Notched and unnotched laminates. Composites Science and Technology, v. 71, p. 998-1007, 2011.

- [27] VIEILLE, B. et al. About the influence of stamping on thermoplastic-based composites for aeronautical applications. *Composites: Part B*, v. 45, p. 821–834, 2013.
- [28] DAS, Monalisa; SAHU, Sasmita; PARHI, Dayal R. A Review of Application of Composite Materials for Aerospace Structures and its Damage Detection Using Artificial Intelligence Techniques. In: *International Conference on Artificial Intelligence in Manufacturing & Renewable Energy (ICAIMRE)*. 2019.
- [29] KESARWANI, Shivi et al. Polymer composites in aviation sector. *Int. J. Eng. Res*, v. 6, n. 06, 2017.
- [30] MIDDLETON, D. H. *Composite materials in aircraft structures*. 1st ed., New York: Longman Scientific & Technical, 1990, 394p.
- [31] BANSEMIR, H.; Haider, O. Fibre composite structures for space applications recent and future developments. *Cryogenics*, v.38, n.1, p.51-59, 2016.
- [32] SMAP - Spaceflight101. Spaceflight101.com. Disponível em: <<http://spaceflight101.com/smap/>>. Acesso em: 30 ago. 2016.
- [33] SCHONBERG, William P. Protecting Earth-orbiting spacecraft against micrometeoroid/orbital debris impact damage using composite structural systems and materials: An overview. *Advances in Space Research*, v.45, n.6, p.709-720, 2010.
- [34] Cantwell, W.J.; Morton, J. Detection of impact damage in CFRP laminates. *Composite Structures*, v.3, n.3-4, p.241-257, 2002.
- [35] DUCHENE P., CHAKI S., AYADI A., KRAWCZAK P. 2018. A Review of Non-Destructive Techniques Used for Mechanical Damage Assessment in Polymer Composites. *Journal of Materials Science*, 53, 7915-7938. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2045-6>.



- [36] MITREVSKI, T.; MARSHALL, I.H.; THOMSON, R. The influence of impactor shape on the damage to composite laminates. *Composite Structures*, v. 76, n. 1-2, p. 116-122, Oct. 2006.
- [37] TARPANI J.R. MILAN M.T. SPINELLI, D. BOSE W.W. 2006. Mechanical Performance of Carbon-Epoxy Laminates Part I: Quasi-Static and Impact Bending Properties. *Materials Research*, 9, 115–120. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392006000200002>.
- [38] J. Summa, M. Becker, F. Grossmann, M. Pohl, M. Stommel, H.G. Herrmann. Fracture analysis of a metal to CFRP hybrid with thermoplastic interlayers for interfacial stress relaxation using in situ thermography. *Composite Structures*, v.193, p.19–28. (2018).
- [39] GHOLIZADEH, Samira. A review of impact behaviour in composite materials. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, v. 7, n. 3, p. 2320-2092, 2019.
- [40] AGRAWAL, Sandeep; SINGH, Kalyan Kumar; SARKAR, P. K. Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite—A review. *Journal of composite materials*, v. 48, n. 3, p. 317-332, 2014.
- [41] ARACHCHIGE, Buddhi; GHASEMNEJAD, Hessammaddin. Post impact analysis of damaged variable-stiffness curved composite plates. *Composite Structures*, v. 166, p. 12-21, 2017.
- [42] REIS, Paulo Nobre Balbis et al. Multi-impact response of semicylindrical composite laminated shells with different thicknesses. *Composite Structures*, v. 310, p. 116771, 2023.
- [43] KRISHNAMURTHY, K. S.; MAHAJAN, P.; MITTAL, R. K. Impact response and damage in laminated composite cylindrical shells. *Composite structures*, v. 59, n. 1, p. 15-36, 2006.

- [44] KRISHNAMURTHY, K. S.; MAHAJAN, P.; MITTAL, R. K. A parametric study of the impact response and damage of laminated cylindrical composite shells. *Composites Science and Technology*, v. 61, n. 12, p. 1655-1669, 2003.
- [45] SEIFOORI, SAJJAD; PARRANY, Ahmad Mahdian; MIRZARAHMANI, S. Impact damage detection in CFRP and GFRP curved composite laminates subjected to low-velocity impacts. *Composite Structures*, v. 261, p. 113278, 2021.
- [46] SAGHAFI, H. et al. Comparison of the effect of preload and curvature of composite laminate under impact loading. *FME Transactions*, v. 44, n. 4, p. 353-357, 2016.
- [47] RODRIGUES, L. P.S. Efeito do Envelhecimento Ambiental Acelerado em Compósitos Poliméricos. 2007. 114f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- [48] OLIVEIRA, B.F. F.M modelo analítico e computacional para consideração de efeitos de envelhecimento em estruturas de material compósito. 2004. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004
- [49] SILVA, D. F. Avaliação do efeito ambiental nas propriedades mecânicas e viscoelásticas de compósitos híbridos metal-fibra de titânio/fibra de carbono/resina epóxi. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia, UNESP, Guaratinguetá, 2011.
- [50] OLIVEIRA, J.F.S. Estudos da Influência da Configuração em Compósitos Poliméricos Híbridos. 2007. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- [51] FARIA, M. C. M.; Avaliação do Efeito Higrotérmico nas Propriedades Mecânicas de Compósitos de PPS/Fibras Contínuas. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG/UNESP), Guaratinguetá, 166 f., 2008.

- [52] YANN, R.; DAMIEN, D.; RACHID, E. G.; PATRICK, F. Anisotropy of hygrothermal damage in fiber/polymer composites: Effective elasticity measures and estimates. *Mechanics of Materials*, vol.38, p. 1143-1158, 2006.
- [53] BOTELHO, E. C., PARDINI, L. C., REZENDE, M. C., Evaluation of Hygrothermal Effects on the Shear Properties of Carall Composites. *Materials Science and Engineering A* 292-301, 2007
- [54] MAZUR, R.L., Obtenção e caracterização de compósitos de fibra de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas. 2010. 142f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- [55] BISMARCK, A.; HOFMEIER, M.; DÖRNER, G. Effect of hot water immersion on the performance of carbon reinforced unidirectional poly(ether ketone) (PEEK) composites: Stress rupture under end-loaded bending. *Composites: Part A*, v.38, p. 407-426, 2007.
- [56] PAPANICOLAOU, G. C., XEPAPADAKI, A. G., TAGARIS, G. D. Effect of thermal shock cycling on the creep behavior of glass-epoxy composites. *Composites Structures*, doi:10.1016/j.compstruct.2008.05.003, 2008.
- [57] DAMATO, C. A. Efeito do condicionamento ambiental nas propriedades de cisalhamento e viscoelásticas de compósitos híbridos metal fibra. 2010.144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- [58] ASTM E1823 - 11 Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing.
- [59] BRANDIM, A. S., SOUSA, R. R. M., ALVES JR., C., Desenvolvimento de um equipamento de fadiga térmica. *Revista Matéria*, v.14,n.1, p 749-758, 2009.

- [60] FRENOT, M. C. L., ROUQUIE, S., Influence of oxidative environments on damage in c/epoxy laminates subjected to thermal cycling. *Composites Science and Technology*, 64, p. 1725–1735, 2004.
- [61] FRENOT, M. C. L., HO, N. Q. Influence of free edge intralaminar stresses on damage process in CFRP laminates under thermal cycling conditions. *Composites Science and Technology*, 66, p.1354–1365, 2006.
- [62] GUNTHER, H., HUBNER, R. Thermal and fatigue cycling of fibre composites. *Cryogenics*, vol. 35, 727-736, 2005.
- [63] SALEKEEN, S. et al. Mechanical property degradation of a Nicalon fiber reinforced SiNC ceramic matrix composite under thermal shock loading. *Composite Structures* 78 (2007) 477–485.
- [64] KATUNIN A., KRUKIEWICZ K., HEREGA A. CATALANOTTI G. 2016. Concept of a Conducting Composite Material for Lightning Strike Protection, 16, 32-46. <https://doi.org/10.1515/adms-2016-0007>.
- [65] SHYR, TIEN-WEI; PAN, YU-HAO. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite Structures*, v.62, n.2, p.193-203, 2003.
- [66] STARGEL, D.S. Experimental and numerical investigation into the effects of panel curvature on the high velocity ballistic impact response of aluminum and composite. *Doutor em Filosofia*, University of Maryland, 2005.
- [67] AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. Introduction to nondestructive. Disponível em: <http://www.asnt.org/ndt/primer1.htm>. Acesso em: Abr.2008.
- [68] BEINE, Carsten et al. NDT for CFRP aeronautical components a comparative study. In: 2nd International Symposium on NDT in Aerospace. 2010. p. 1-9.

- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] SWIDERSKI, W.; SZABRA, D.; WOJCIK, J. Nondestructive evaluation of aircraft components by thermography using diferente heat sources. *Quantitative Infrared Thermography*, v.6,n.1, p. 79-84, 2002.
- [72] SHEPARD, S.M.; LHOTA, J.R.; AHMED, T.; HOU, Y.L. Thermographic inspection of composite structures. *SAMPE Journal*, v. 39, n. 5, p. 53-59, 2003.
- [73] GONCALVES, C. B. Detecção de câncer de mama utilizando imagens termográficas. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- [74] V. Karbhari. *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites: Techniques and Applications*. 1ª ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013, pp. 309–332. isbn: 9780857093448. doi: 10.1533/9780857093554.
- [75] WEI Z., FERNANDES H., HERRMANN G., TARPANI J.R., OSMAN A. 2021. Deep Learning Method for The Impact Damage Segmentation of Curve- haped CFRP Specimens Inspected by Infrared Thermography. *Materials*, 21, 395-413. <https://doi.org/10.3390/s21020395>.
- [76] GRYS S., MINKINA W., VOKOROKOS L. 2015. Automated Characterisation of Subsurface Defects by Active IR Thermographic Testing - Discussion of Step Heating Duration and Defect Depth Determination. *Infrared Physics & Technology*, 68, 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.11.005>

- [77] CIAMPA, F et al. "Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components". Em: *Sensors* 18.2 (2018). issn: 14248220.doi:10.3390/s18020609.
- [78] SHAONI JIAO, JIAN LI, FEI DU, Lei Sun, Zhiwei Zeng, "Características da distribuição de correntes parasitas em polímero reforçado com fibra de carbono", *Journal of Sensors* , vol. 2016, artigo ID 4292134, 8 páginas, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4292134>
- [79] HAKIM, I. , DONALDSON, S. , MEYENDORF, N. and Browning, C. (2017) Porosity Effects on Interlaminar Fracture Behavior in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Materials Sciences and Applications*, 8, 170-187. doi: 10.4236/msa.2017.82011.
- [80] XU, XIAOJUAN et al. 'Detecção de delaminação em compósitos laminados de CFRP usando testes de correntes parasitas: simulação e estudo experimental'. 1 de janeiro de 2018: 177 – 192.
- [81] HL Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods," John Wiley & Sons, Inc., Capítulo 2, Capítulo 3, (1971).
- [82] JA NYENHUIS, JC Treece e JM Drynan, "Aquisição de dados para verificação experimental de um modelo de corrente parasita para inversão tridimensional", *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-23 , nº 5, pp.3789–3791, 1987.
- [83] KOYAMA, K. et al. Investigation of impact damage of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by eddy current non-destructive testing. In: *International Workshop Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*. 2011. p. 2-4
- [84] HE, Yunze et al. Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current. *Composites Part B: Engineering*, v. 59, p. 196-203, 2014.

- [85] LI, XIN. Eddy current techniques for non-destructive testing of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). The University of Manchester (United Kingdom), 2012.