



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

DANILO AUGUSTO DE PAULA

Método de avaliação de ensaios não destrutivos em componentes aeronáuticos

Guaratinguetá
2023

Danilo Augusto de Paula

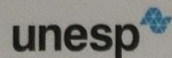
Método de avaliação de ensaios não destrutivos em componentes aeronáuticos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jose Vitor Candido de Souza

Guaratinguetá
2023

P324m	Paula, Danilo Augusto de Método de avaliação de ensaios não destrutivos em componentes aeronáuticos / Danilo Augusto de Paula - Guaratinguetá, 2023. 51 f : il. Bibliografia: f. 51 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza 1. Testes não destrutivos. 2. Materiais compostos. 3. Ultrassom. 4. Indústria aeroespacial. I. Título. CDU 620.178.7
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

DANILO AUGUSTO DE PAULA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador(a)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSE VITOR CANDIDO DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG

Ma. FLAVIA DIAS FERNANDES
Membro Externo

Eng. RONALDO APARECIDO DA SILVA
Membro Externo

Fevereiro / 2023

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Dulcinea Paula, e ao meu pai Luiz Roberto Paula, pelo apoio, amor e compreensão durante a trajetória até este ponto.

A minha irmã, Natalia Buzzo, por mostrar o caminho e servir de exemplo durante a jornada.

A minha esposa, Daniela Lucchiari, pelo apoio, paciência, amor, dedicação e por ser mais do que poderia descrever em um agradecimento.

A toda equipe de engenheiros de manutenção e estrutura relacionados com ensaios não destrutivos, Evandro Boldarini, Fabio Simomura, Marcos Miranda, Ronaldo Silva, pelo companheirismo e disponibilização dos equipamentos para realização dos ensaios.

Ao meu orientador José Vitor Candido de Souza, pelos exemplos de confiança, coragem, dedicação, perseverança e companheirismo ao me permitir e incentivar no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os moradores e ex-moradores da república TNT, que participaram e participam deste caminho, no campo pessoal e profissional, pela amizade, carinho e companheirismo.

A todos os meus amigos e familiares que participaram direta e indiretamente desta trajetória.

Aos funcionários da Unesp, pela solicitude nos serviços prestados.

“A persistência é o caminho do êxito”;
Charles Chaplin

RESUMO

Os ensaios não destrutivos, conhecido como END, são amplamente utilizados na indústria aeronáutica e aeroespacial, devido a sua capacidade de identificação e avaliação de possíveis defeitos em componentes, sem prejudicar a integridade do material submetido ao ensaio. Uma vez que essas industriais possuem diversos tipos de materiais em seu produto, os compósitos foram selecionados para serem o objeto deste estudo e ainda em compósitos existe uma vasta gama de aplicabilidade em componentes aeronáutico, adotou-se dois perfis, sendo eles laminado e sanduíche. A partir da seleção dos corpos de prova, voltou-se a atenção para o ensaio não destrutivo de ultrassom, pois foi avaliado que este possuía critérios suficientes para se realizar a detecção e validação dos corpos de prova, comparado com os demais ensaios não destrutivos considerados clássicos. O objetivo deste estudo é definir parâmetros e técnicas apropriados para a realização de uma inspeção e validação do material como conforme ou não conforme. A partir da revisão bibliográfica e aplicação dos conceitos, concluiu-se que para ensaiar componentes constituídos de compósito no layout laminado, a técnica eco pulso é a mais apropriada, possibilitando a detecção da presença de descontinuidades e sua posição no material. Enquanto que para o perfil sanduíche, a técnica apropriada é a transmissão que possibilita a identificação de descontinuidades no corpo de prova, mas não é possível identificar a sua posição. Portanto, com essas informações foi possível desenhar um fluxograma dos critérios necessários para realizar uma tarefa de inspeção. É válido ressaltar ainda que aprende-se com este estudo que não existe um melhor método de ensaio não destrutivo que poderá ser aplicado em qualquer ocasião, mas sim que é necessário avaliar cada caso e selecionar um método mais adequado para aplicação em questão, ainda se necessário utilizar mais de um ensaio não destrutivo para elaboração do laudo de integridade.

PALAVRAS-CHAVE: END; ensaio não destrutivo; compósito laminado; compósito sanduíche; ultrassom.

ABSTRACT

Non-destructive tests, known as NDT, are widely used in the aeronautical and aerospace industry, due to their ability to identify and evaluate possible defects in components, without harming the integrity of the material submitted to the test. Since these industries have different types of materials in their product, the composites were selected to be the object of this study and even in composites there is a wide range of applicability in aeronautical components, two profiles were adopted, laminated and sandwich. From the selection of the test specimens, attention was turned to the non-destructive ultrasound test, as it was evaluated that it had sufficient criteria to perform the detection and validation of the test specimens, compared to the other non-destructive tests considered classics. The objective of this study is to define appropriate parameters and techniques for carrying out an inspection and validation of the material as compliant or non-compliant. From the bibliographic review and application of the concepts, it was concluded that to test components made of composite in the laminated layout, the echo pulse technique is the most appropriate, enabling the detection of the presence of discontinuities and their position in the material. While for the sandwich profile, the appropriate technique is the transmission that allows the identification of discontinuities in the specimen, but it is not possible to identify its position. Therefore, with this information, it was possible to draw a flowchart of the criteria necessary to carry out an inspection task. It is also worth emphasizing that what was learned from this study is that there is no best method of non-destructive testing that can be applied at any time, but rather that it is necessary to evaluate each case and select a method that is most appropriate for the application in question, even if necessary to use more than one non-destructive test to prepare the integrity report.

KEYWORDS: NDT; non-destructive test; laminated plate; sandwich panel; ultrasound..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Compósitos na constituição da aeronave de 1970 a 2020.....	16
Figura 2 – Componentes da estrutura da aeronave.....	16
Figura 3 – Compósito laminado.....	18
Figura 4 – Compósito sanduíche.....	18
Figura 5 – Distribuição de cargas no compósito sanduíche.....	18
Figura 6 – Distribuição de materiais em um Boeing 787.....	19
Figura 7 – Princípio do ensaio líquido penetrante.....	20
Figura 8 – Princípio do ensaio partícula magnética.....	21
Figura 9 – Princípio do ensaio Eddy Current.....	22
Figura 10 – Aplicação do pulso-eco em uma seção retangular.....	23
Figura 11 – Lista de defeitos típicos em materiais compósitos.....	24
Figura 12 – Ondas longitudinais.....	27
Figura 13 – Ondas transversais.....	27
Figura 14 – Campo de audibilidade das vibrações mecânicas.....	28
Figura 15 – Representação A-scan.....	29
Figura 16 – Sistema pulso-eco.....	30
Figura 17 – Sistema transmissão.....	31
Figura 18 – Fluxo sobre a escolha da metodologia científica.....	32
Figura 19 – Fluxo método de pesquisa.....	33
Figura 20 – Omniscan MX2.....	34
Figura 21 – Cabo LCM-74-X.....	33
Figura 22 – V201-RM.....	35
Figura 23 – V206-RM.....	35
Figura 24 – C106.....	35
Figura 25 – CDP laminado.....	36
Figura 26 – CDP sanduíche.....	37
Figura 27 – Metodologia inicial.....	37
Figura 28 – Região 7 conforme.....	41
Figura 29 – Região 7 não conforme.....	41
Figura 30 – Região 7 delimitação.....	42
Figura 31 – Metodologia layout laminado.....	43
Figura 32 – V206-RM no CDP de 30.20 mm.....	44

Figura 33 – C106 no CDP de 30.20.....	45
Figura 34 – C106 no CDP de 19.02.....	46
Figura 35 – Técnica de transmissão.....	46
Figura 36 – Metodologia layout sanduíche.....	47
Figura 37 – Metodologia final.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da utilização de materiais compósitos.....	17
Quadro 2 – Lista de defeitos típicos em materiais compósitos.....	25
Quadro 3 – Configuração do Omniscan MX2.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros definidos durante a calibração.....	40
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CDP	Corpo de prova
END	Ensaio não destrutivo
NDT	Non-destructive test

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivos específicos.....	14
2	DESNVOLVIMENTO	15
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.1	Líquido penetrante.....	20
2.1.2	Partícula magnética.....	21
2.1.3	Correntes parasita.....	21
2.1.4	Ultrassom.....	22
2.1.5	Radiográfico.....	23
2.1.6	Defeitos em materiais compósitos.....	24
2.1.7	Definição do método de inspeção e validação.....	25
2.2.7.1	Caracterização do ensaio de ultrassom	26
2.2.7.2	Ondas ultrassônicas	27
2.2.7.3	Frequência	28
2.2.7.4	Comprimento de onda e frequência	28
2.2.7.5	Acoplantes	29
2.2.7.6	Detector de falhas	29
2.2.7.7	Técnicas de inspeção	30
2.2.7.7.1	<i>Pulso-eco.....</i>	30
2.2.7.7.2	<i>Transmissão.....</i>	31
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS	31
2.2.1	Classificação da pesquisa	31
2.2.2	Roteiro da pesquisa	32
2.2.3	Materiais utilizados	33
2.2.4	Método aplicado	37
2.3	RESULTADOS	39
3	CONCLUSÃO	49
3.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	50
3.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Existe uma variedade de métodos para avaliação de materiais ou componentes, sendo o método dos ensaios não destrutíveis um dos mais relevantes, possuindo diversas aplicações. Os ensaios não destrutíveis (END) envolvem a identificação e caracterização de danos superficiais e no interior dos materiais sem remoção ou alteração na estrutura do material (LOCKARD, 2015). Em outras palavras, END refere-se a avaliação e processos de inspeção de materiais ou componentes para caracterização ou detecção de defeitos e falhas em comparação com um modelo padrão sem alterar as características ou geometrias do objeto que está sendo exposto ao ensaio.

As técnicas advindas dos END fornecem uma opção economicamente viável para realização de testes em um corpo de prova, podendo ser utilizada para uma análise pontual ou aplicada para avaliação de todos os materiais de um sistema de produção, garantindo um controle de qualidade eficiente (LOCKARD, 2015).

Com o objetivo de estabelecer limites para o assunto abordado neste estudo, adotaremos as aplicações dos END na indústria aeronáutica e aeroespacial, visto que devido a sua complexidade, todo componente deve ser cuidadosamente avaliado antes de ser montado. Durante o seu período de operação, a aeronave e seus componentes são monitorados periodicamente a fim de garantir o bom funcionamento durante o seu ciclo de vida.

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) é o órgão regulador da aviação no país. Através de Instrução Suplementar, estabelece os critérios aceitáveis, mas não únicos, para detalhar e orientar a inspeção por ensaios não destrutíveis. O assunto END é transposto em dois documentos: a Instrução Suplementar – IS 145.163-001A, que trata da qualificação em ensaios não destrutivos, e a Instrução Suplementar – IS 43.13-003C, que trata dos métodos de ensaio, ambas aplicáveis na aviação civil brasileira (ANAC, 2013).

Desde o primeiro aeromodelo, já ocorreu uma revolução nos materiais aeroespaciais. Na década de 1930, por exemplo, estágios iniciais da aviação, os aviões eram constituídos de materiais compósitos naturais, sendo compostos por abeto e madeira. Porém, devido a diversos fatores, como por exemplo o clima e o teor de umidade, as estruturas desse composto se deterioravam rapidamente, impactando diretamente na vida útil da aeronave. Com o passar do tempo, o composto de madeira foi substituído por metal e a seguir iniciaram-se os estudos sobre materiais compósitos, visando a otimização de peso, a resistência a corrosão e a resistência à fadiga. Pois, para melhoria da performance da aeronave, como capacidade de

carga, decolagem e pouso se faz necessário uma estrutura leve, conforme a apresentando na obra de Mazlan (2022).

Os estudos relativos a materiais compósitos veem crescendo e aplicação deste em aeronaves vêm aumento, no início da indústria aeronáutica por volta de 10 % do aeromodelo era constituído de materiais compósitos. Atualmente, o Boeing 787 e o Airbus A350 usam aproximadamente mais de 50 % de peças e componentes constituídos de materiais compósitos (MAZLAN, 2022).

A partir das informações apresentadas, se justifica a relevância do estudo dos métodos de avaliação dos componentes aeronáuticos fabricados com materiais compósitos, utilizando os ensaios não destrutivos. Este estudo, busca responder a seguinte pergunta: Quais os ensaios não destrutivos indicados para avaliação e caracterização dos materiais compósitos laminados e compósitos sanduíches aplicados em aeronaves?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é mapear e identificar quais são os ensaios não destrutivos indicados para avaliação e caracterização dos materiais compósitos laminados e compósitos sanduíches utilizados em componentes aeronáuticos e por fim desenvolver uma metodologia para desenvolvimento da inspeção.

Este estudo foi realizado com uma quantidade limitada de corpo de provas, presentes em uma unidade de negócio de uma companhia aeronáutica. Logo, os resultados obtidos a partir deste estudo devem ser avaliados previamente e adequados conforme necessidade, no caso de utilização das conclusões obtidas.

1.1.1 Objetivos específicos

- Mapear os ensaios não destrutivos aplicados em materiais compósitos.
- Determinar o método para realização de ensaios não destrutivos em compósitos.
- Desenvolver uma metodologia para aplicação de ensaios não destrutivos em compósitos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aplicação e a avaliação dos ensaios não destrutivos influenciam a civilização humana desde os tempos antigos. Isto tem sido fundamental para melhorar a qualidade de vida dos seres humanos através dos métodos END, o que auxiliar para o desenvolvimento e melhora da percepção do mundo ao nosso redor. Os END como conhecemos, ganharam destaque a partir da primeira e da segunda guerra mundial, visto que foi um período crítico da humanidade, mas também um período de avanço tecnológico.

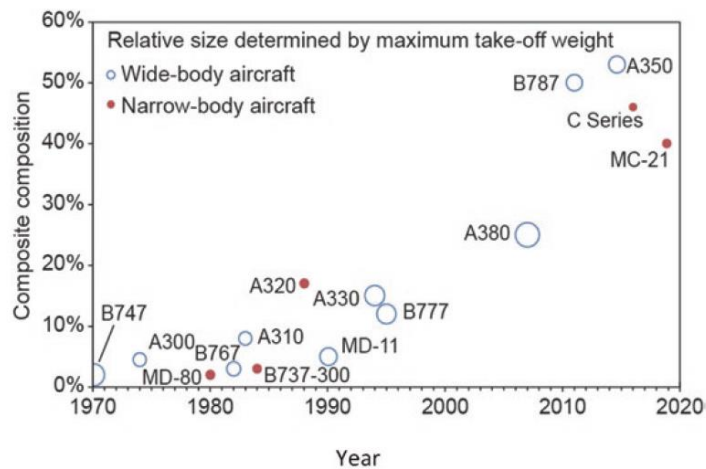
Deste modo, a aplicação dos END em diversos setores vem crescendo e se desenvolvendo significativamente, entre esses a aplicação desses métodos no setor aeronáutico, o qual é objeto deste estudo. Conforme defendido na obra de Prasad (2011) a aplicabilidade dos END na indústria aeronáutica e aeroespacial, pode ser direcionada a partir dos parâmetros apresentando a seguir:

- *The selection of materials and manufacturing processes is dictated by design requirements of high specific strength and stiffness. This means that components have to be light weight and highly loaded. Tolerance for design stipulated properties and the dimensions, size and distribution of defects is very stringent.*
- *Aircraft and aero-engine components operate under cyclic loading and are prone to fatigue cracking. Further, components are subjected to a hostile environment of corrosion, erosion, extreme temperature variation and lightning strikes.*
- *Increasing usage of composites, foam honeycomb and sandwich structure, particularly for aircraft and aerospace components.*

(PRASAD, 2011, p. 182)

Dito isso, a próxima delimitação do estudo, será a avaliação dos componentes aeronáuticos constituídos de materiais compósitos. Conforme, sugestão do Capítulo 1, os estudos relativos a materiais compósitos vêm crescendo devido ao seu aumento percentual na composição da aeronave com o passar do tempo. Podemos analisar esse crescimento objetivamente na Figura 1.

Figura 1 - Compósitos na constituição da aeronave de 1970 a 2020

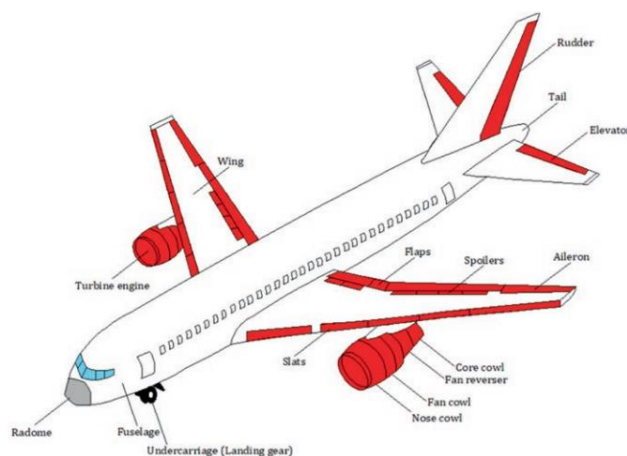


Fonte: Mazlan (2022)

Os compósitos são relevantes, pois promovem flexibilidade para atendimento dos critérios pré-estabelecidos no projeto, ou seja, é possível adotar diversas composições para alcançar diversas características desejadas nos materiais. É possível descrever os materiais compósitos em três classes sendo compósito de matriz cerâmica (CMC), compósito de matriz polimérica (CMP) e compósito de matriz metálica (CMM) (MAZLAN, 2022).

Com o intuito de exemplificar quais componentes são constituídos de materiais compósitos na composição da estrutura de uma aeronave, podemos citar por exemplo a fuselagem, asa, cauda e trem de pouso. Note na Figura 2 os componentes fabricados com materiais compósitos mais utilizados, mas não únicos, em uma aeronave atualmente.

Figura 2 - Componentes da estrutura da aeronave



Fonte: Mazlan (2022).

A utilização de materiais compósitos nesses componentes, se deve a diversos fatores. Na asa por exemplo, recentemente tem sido selecionado uma fibra de carbono reforçado para composição do equipamento, visto que a asa tem a função de sustentação, transportando altas cargas e atuando como tanque de combustível, exigindo que o revestimento da asa seja multifuncional, suportando altas cargas de torção. Como o objetivo deste estudo não é explicar a seleção de um material compósito para componentes aeronáutico, uma tabela é o suficiente para compreendermos as vantagens e desvantagens da utilização de um compósito para composição de componentes de uma aeronave. Vide Quadro 1.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da utilização de materiais compósitos

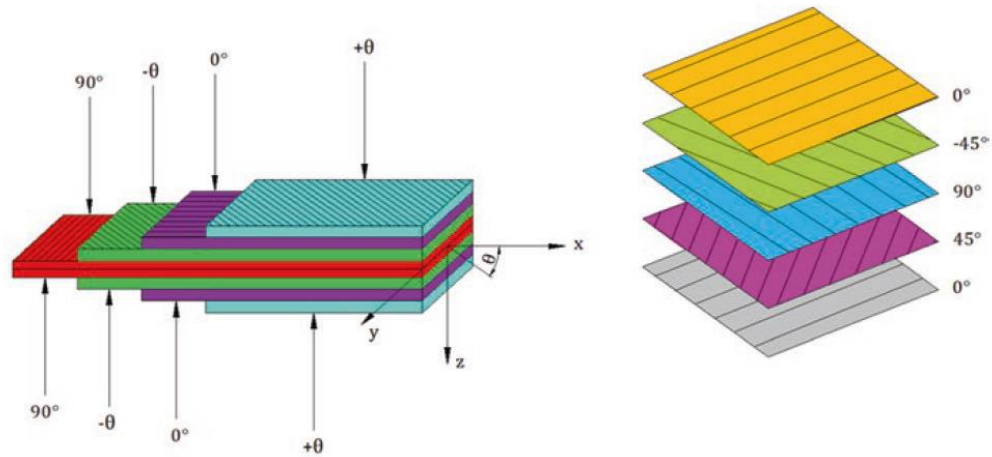
Vantagens	Desvantagens
Alta resistência específica a rigidez	Usinabilidade limitada
Aumento da vida em serviço	Necessidade de inspeção rigorosa
Ausência de corrosão	Necessidade de ensaios
Alta resistência a fadiga	Matéria-prima perecível
Redução do número de partes	Processo de fabricação complexo
Obtenção de geometrias mais complexas	
Baixo índice de peso x resistência	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os materiais compósitos aplicados na indústria aeronáutica e que serão abordados neste estudo são fabricados de duas maneiras, sendo elas compósitos laminados (Figura 3) ou compósitos sanduíches (Figura 4). Múltiplas camadas de fibra e resina são coladas para realização do laminado. Fibra de carbono com resina epóxi constituem um laminado utilizado na estrutura da aeronave, como a fuselagem, para suportar cargas elevadas.

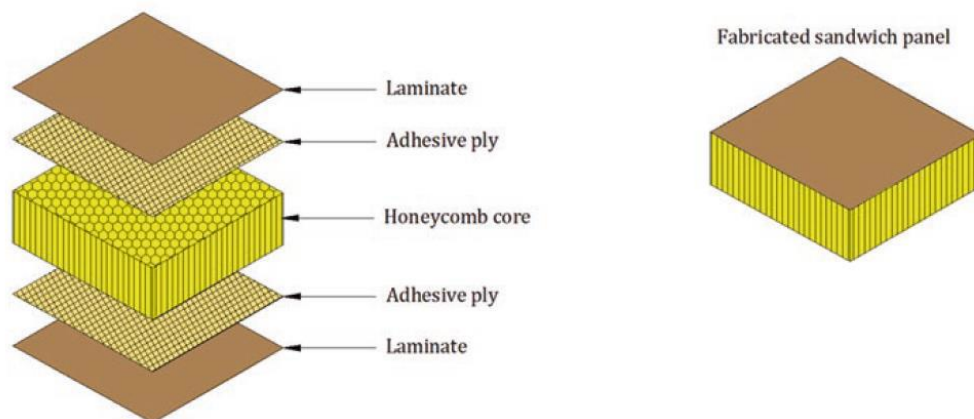
De acordo com a obra de Mazlan (2022), essas camadas usualmente possuem uma direção de atuação, direção essa em que o compósito irá resistir aos esforços, portanto é possível estruturar laminados realizando o empilhamento das camadas para garantir a resistência aos esforços em mais de uma direção, conforme apresentado na Figura 3. Por outro lado, o compósito em forma sanduíche, são 2 camadas de material colados por meio de um filme a um núcleo espesso de material, constituído de um material de baixa densidade, por exemplo, madeira e espuma, podendo ser metálico ou não, promovendo assim um alta relação de rigidez por peso (Figura 4). O papel das duas camadas, superior e inferior, são resistir a tração e compressão, e quanto que o núcleo é o responsável por suportar as tensões de cisalhamento (Figura5).

Figura 3 - Componentes da estrutura da aeronave



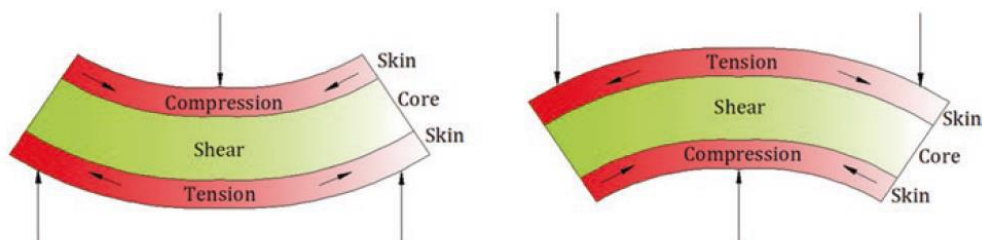
Fonte: Mazlan (2022).

Figura 4 – Compósito sanduíche



Fonte: Mazlan (2022).

Figura 5 – Distribuição de cargas no compósito sanduíche

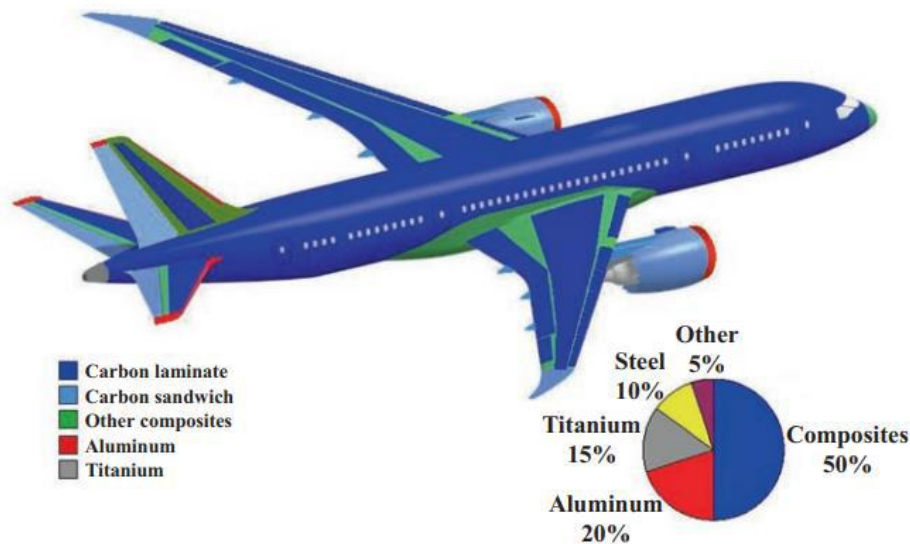


Fonte: Mazlan (2022).

Por fim, para englobar esses conceitos de vantagens e desvantagens da utilização de materiais compósitos, em quais componentes eles são aplicados e quais os layouts são

selecionados para composição das peças, em adicional ilustrar essas informações em uma aeronave real, a Figura 6 traz a composição do Boeing 787 Dreamliner.

Figura 6 – Distribuição de materiais em um Boeing 787



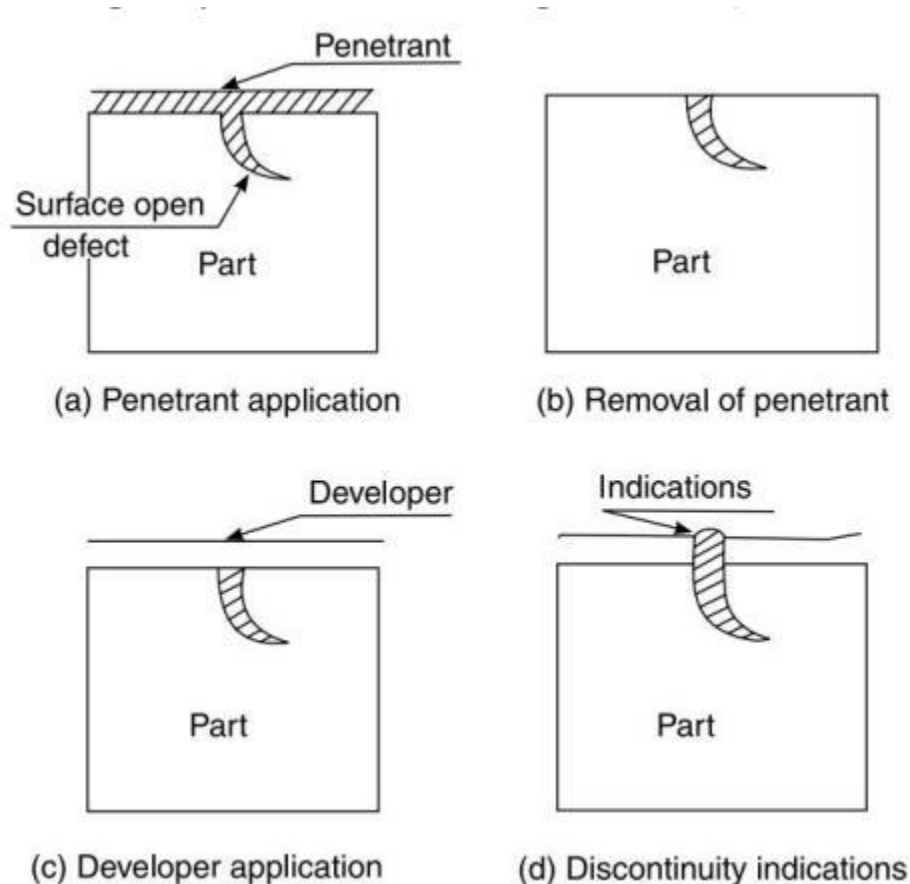
Fonte: Mazlan (2022).

A partir desta contextualização, podemos iniciar a avaliação dos métodos de ensaios não destrutíveis aplicados em componentes aeronáuticos constituídos em compósitos. Para isso, se faz necessário estabelecer alguns critérios que serão adotados durante o desenvolvimento das atividades, sendo utilizado como diretriz a IS N° 43.13-003 (ANAC, 2013). Este documento apresenta os ensaios não destrutivos aprovados pela ANAC, pois estes END já são devidamente estudados, avaliados e difundidos em território nacional e internacional. Os END autorizados, são: Ensaios por Líquidos Penetrantes – LP; Ensaios por Partículas Magnéticas – PM; Ensaios por Correntes Parasitas – CP; Ensaios por Ultrassom – US; Ensaios radiográficos – RI; Ensaios por Termografia – TG; Ensaios por Shearografia – SG; outros métodos (ANAC, 2013). Porém, para o desenvolvimento deste material, será avaliado apenas os métodos considerados clássicos, sendo eles: LP; PM; CP; US; RI. Isso se deve ao fato limitante de variedade de corpos de prova e disponibilidade para execução dos ensaios.

2.1.1 Líquido penetrante

O ensaio não destrutivo de líquido penetrante é utilizado para detectar descontinuidades abertas em superfícies sólidas e essencialmente em materiais não porosos. O método emprega um líquido penetrante, aplicado sob uma superfície limpa, o qual se acomoda nas descontinuidades decorrente da ação capilar. Após um tempo adequado, pré-determinado, o excesso do líquido penetrante é removido, a partir da aplicação de um solvente ou água, dependendo da composição do líquido penetrante utilizado. Em seguida, a superfície seca recebe a aplicação de uma fina camada uniforme de revelador. O revelador atua como um “mata-borrão” retirando qualquer líquido remanescente na descontinuidade. A Figura 7, ilustra o ensaio de líquido penetrante. As indicações devem ser avaliadas a luz do dia, iluminação artificial ou sob a luz negras, dependendo do tipo de líquido penetrante (PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 7 – Princípio do ensaio líquido penetrante

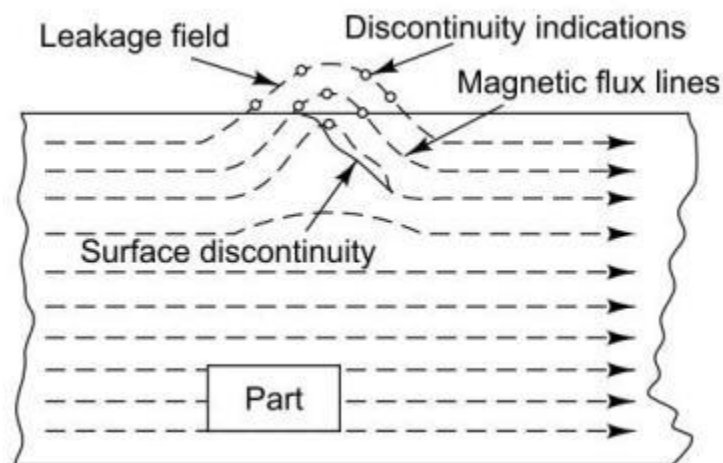


Fonte: Prasad (2011).

2.1.2 Partículas magnéticas

Ensaio baseado em partículas magnéticas consiste em um material ferromagnético é inserido em um campo magnético, o mesmo é magnetizado e o campo magnético forma um circuito contínuo polo a polo através do material. Se qualquer descontinuidade superficial ou logo abaixo da superfície estiver presente o campo magnético é desviado e forma um campo de fuga, conforme Figura 8. Se pequenas partículas de um material magnético é aplicado sob a superfície magnetizada, o campo de fuga atrai essas partículas que formam um esboço da descontinuidade indicando localização, tamanho, forma e extensão. O método é sensível para identificação de defeitos finos superficiais e logo abaixo da superfície (PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 8 – Princípio do ensaio partícula magnética



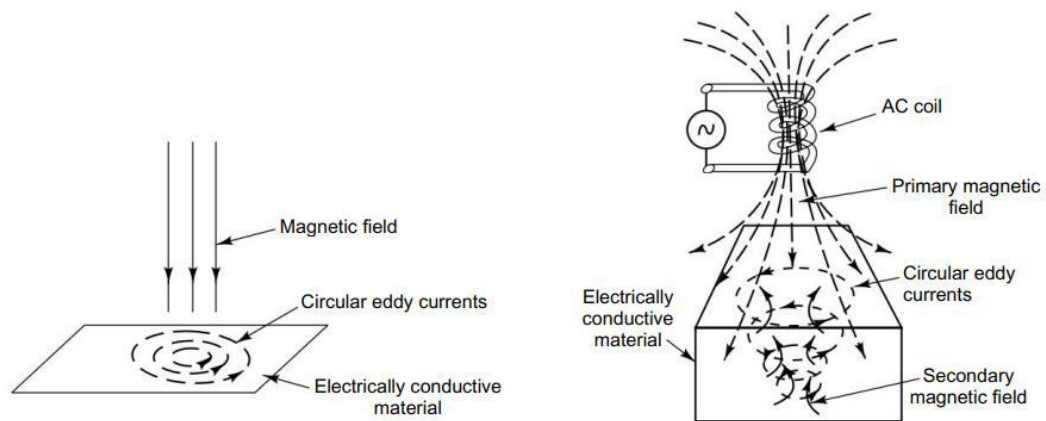
Fonte: Prasad (2011).

2.1.3 Correntes parasita

O ensaio de corrente parasita também é conhecido como ensaio *Eddy Current*. Quando o fluxo magnético através de um condutor é alterado, as correntes induzidas são configuradas em caminhos fechados na superfície do condutor. Essas correntes estão em uma direção perpendicular ao fluxo magnético e são chamadas correntes parasitas. A Figura 9 ilustra a corrente parasita e o arranjo básico para a produção dessas correntes em um material condutor. Quando é aplicado uma corrente alternada através de uma bobina, um campo magnético é formado em torno dela. A direção do campo magnético muda a cada ciclo da corrente

alternada. Caso um condutor seja trazido para perto deste campo, correntes parasitas serão induzidas nele. A direção da corrente parasita muda a partir da mudança de direção do campo magnético durante os ciclos da corrente alternada. (PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 9 – Princípios do ensaio Eddy Current



Fonte: Prasad (2011).

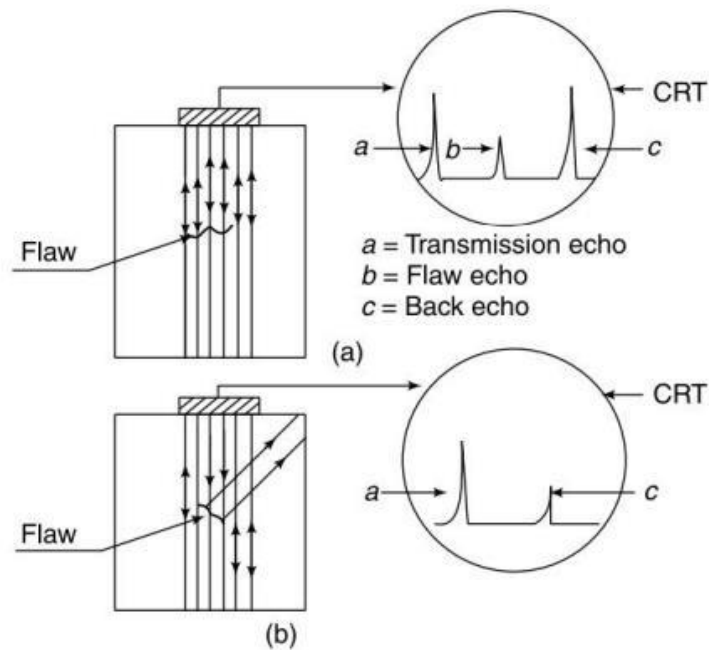
A corrente parasita induzida produz seu próprio campo magnético em uma direção oposta ao campo magnético primário. O campo magnético secundário, devido a corrente parasita interage com o campo magnético primário, acarretando a alteração no campo magnético global e a magnitude do campo corrente que flui através da bobina. Isso significa que a impedância da bobina é alterada devido à influência da corrente parasita. Durante os ensaios, as mudanças de impedância são exibidas no equipamento ou em um medidor (PRASAD, 2011, adaptado).

2.1.4 Ultrassom

O ensaio não destruível de ultrassom baseia-se na energia sonora acima da frequência audível de 16.000 Hz é designada como ultrassônica. É uma forma de energia mecânica e se propaga através do meio material como uma onda de tensão por ação direta e contatos em massa. A propagação dessas ondas através do meio material é sustentada e controlada pelas propriedades elásticas do meio. Para geração das ondas mecânicas são utilizados transdutores que são dispositivos para gerar e receber ultrassom. Por fins de ensaio não destrutivo, elementos piezoelétricos de dimensões adequadas são usados para gerar a gama completa de frequências ultrassônicas em todos os níveis de intensidade. Os transdutores convertem

energia em energia mecânica (vibração) e vice-versa. A partir, do momento em que essa onda mecânica detecta uma descontinuidade no material o equipamento retornar um sinal em sua tela, como por exemplo a Figura 10, onde está sendo aplicado a técnica pulso eco em um material como formato retangular uniforme, a vantagem deste ensaio é que podemos detectar com precisão a forma, o tamanho e a profundidade da descontinuidade (PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 10 – Aplicação do pulso eco em uma seção retangular



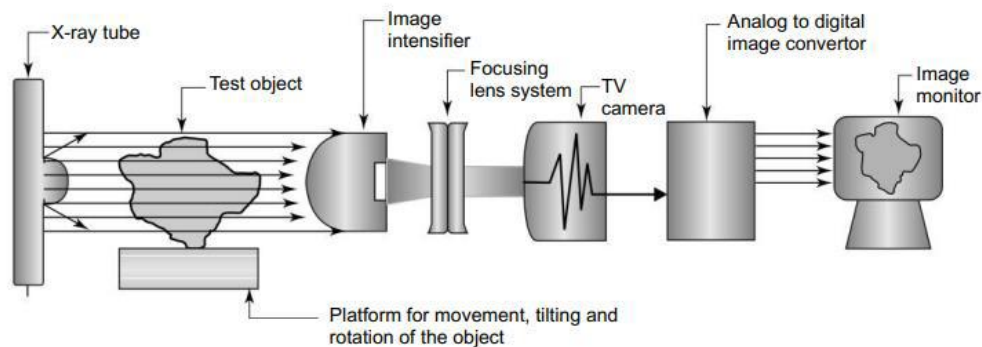
Fonte: Prasad (2011).

2.1.5 Radiográficos

O ensaio não destrutivo por radiografia é usualmente realizado pela utilização de raios-x e raios gama. Os raios-x são produzidos quando elétrons em alta velocidade colidem com um aparato metálico que se encontra enclausurado em vidro no vácuo. Já os raios gamas são semelhantes aos raios-x, exceto por serem emitidos pelo núcleo do átomo e ainda consistem em comprimentos de onda muito mais curtos que os dos raios-x. A radiação penetrante como raios X ou raios gama que passam por um meio material interagem com a matéria de forma complexa. O efeito da interação é a atenuação da radiação incidente. A atenuação resulta em duas formas, sendo elas a absorção e o espalhamento. A radiografia é essencialmente uma técnica de projeção de um objeto tridimensional em um plano, utilizando alguns das propriedades dos raios X, raios gama ou qualquer outra radiação de penetração. As

propriedades usadas são: propagação retilínea; absorção diferencial; efeitos fotográficos ou fluorescência. Os requisitos essenciais para produção de uma radiografia são: fonte de radiação; objeto; meio de gravação; processamento de produtos químicos. A seguir, é possível compreender o processo de inspeção por END radiográfico em tempo real, vide Figura 11(PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 11 – Esquema de um ensaio radiográfico em tempo real



Fonte: Prasad (2011).

2.1.6 Defeitos em materiais compósitos

Um dos aspectos mais importantes para a seleção de um método de inspeção é a compreensão dos defeitos que podem ser encontrados no componente durante as tarefas de inspeção, em outras palavras, saber o que se procura é fundamental. Por esta razão, é importante toda essa contextualização sobre os materiais compósitos e seus layouts.

Neste tópico iremos entender os defeito ou discontinuidades que podem ser detectadas em um componente constituído de compósitos. De acordo com Djordevic (2009) os danos tipicamente encontrados neste material são delaminação ou descolagem (laminado com laminado ou laminado com o núcleo), rompimento das fibras devido a impactos, danos a partir da fadiga que afetam os materiais compósitos via micro quebras, delaminação das fibras, quebras nas fibras acarretando numa perda na média do módulo de elasticidade ou pode ser causada por exposição a altas temperaturas durante períodos extensos, assim como a combinação de efeitos a partir de condições de operação severas. A detecção e avaliação de danos em compósitos é essencial, visto que os danos usualmente não são passíveis de detecção a olho nu e podem ocorrer de diversas formas. A Tabela 2 a seguir apresenta os tipos de defeitos que podem ser detectados em materiais compósitos.

Quadro 2 – Defeitos em materiais compósitos

Defeitos em compósitos	
Delaminação	Vazios entre as camadas
Descolamento	Quebra
Porosidade	Perca da propriedade
Contaminação	Ondulação nas fibras
Tempo de cura inapropriado	Problemas estruturais (Geometria)
Excesso / Falta de resina	Espessura não homogênea
Dano nas fibras	Problemas dimensionais

Fonte: Elaborado pelo autor

2.1.7 Definição do método de inspeção e avaliação

Segundo os autores Prasad (2011) e Mazlan (2022), entre os métodos clássicos descritos anteriormente os mais indicados para inspeção e avaliação de materiais compósitos seria os ensaios de ultrassom e de radiografia, devido a constituição do material, independentemente de ser laminado ou sanduíche, a caracterização dos defeitos possíveis se torna mais eficiente quando aplicado estes dois métodos. Entretanto, com o intuito de operacionalizar o processo de inspeção, o método radiográfico traz uma quantidade maior de desafios, uma vez que a radiação ionizante sensibilizadora de filmes do raio-x e raios gama é altamente prejudicial aos seres humanos, consequentemente o processo de inspeção requer cuidados especiais de proteção para os agentes que realizarão o ensaio. Além disso, precauções especiais com relação ao meio ambiente devem ser fornecidas. Por estas razões e para limitar o escopo do estudo, será desenvolvida a proposta de metodologia para ensaios não destrutivos em compósitos laminares e sanduiches o método de ultrassom, uma vez que o equipamento para realização das tarefas de inspeção podem ser utilizados equipamentos portáteis para fácil transporte e deslocamento como também equipamentos de grande porte, os quais não possuem mobilidade, ou seja, os corpos de prova deverão ser levados até o local do equipamento e ainda são controlados a partir de softwares e o desenvolvimento da inspeção e coleta de dados são automatizados.

2.1.7.1 Caracterização do ensaio de ultrassom

Como citado anteriormente na subsecção 2.1.4, o ensaio por ultrassom, caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades internas e externas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Este método é baseado na emissão de ondas mecânicas através de transdutores para o material. Os transdutores são montados nos cabeçotes, os quais reúnem os componentes necessários para o funcionamento dos transdutores com os equipamentos detectores de falhas. Com isso, aplica-se um acoplante no material para facilitar a penetração das ondas mecânicas geradas através dos transdutores e o equipamento de falha plota em seu visor os pulsos para análise do inspetor. Com o ensaio previamente descrito, se faz necessário compreender cada fator integrante desse processo.

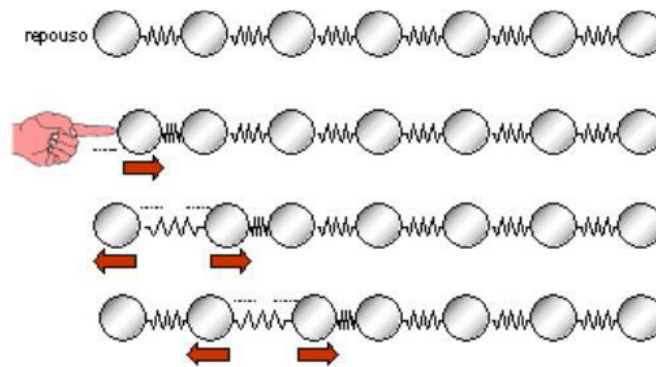
2.1.7.2 Ondas ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas e se comportam da mesma forma que as ondas sonoras em frequências audíveis. Eles viajam em meios elásticos, transferindo energia mecânica entre suas partículas. As partículas no meio oscilam em torno de um ponto médio, mas não se movem, ou seja, não transportam matéria. (ANDREUCCI, 2018, adaptado)

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em um meio homogêneo é constante e depende de suas propriedades físicas e mecânicas. A velocidade também depende do tipo de onda que passa pelo meio, ondas longitudinais têm uma velocidade maior que ondas transversais no mesmo meio.

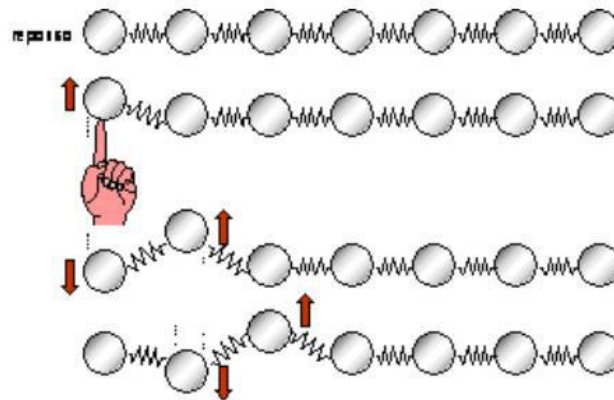
Quando a oscilação ocorre na direção de propagação, a onda é chamada de onda longitudinal (Figura 12) ou de compressão, e quando a oscilação ocorre perpendicularmente à direção de propagação da onda, é chamada de onda transversal ou de cisalhamento (Figura 13). As ondas de compressão se propagam em meios sólidos, líquidos e gasosos, e essas ondas de cisalhamento, apenas em meio sólido.

Figura 12 – Ondas longitudinais



Fonte: Andreucci (2018).

Figura 13 – Ondas transversais



Fonte: Andreucci (2018).

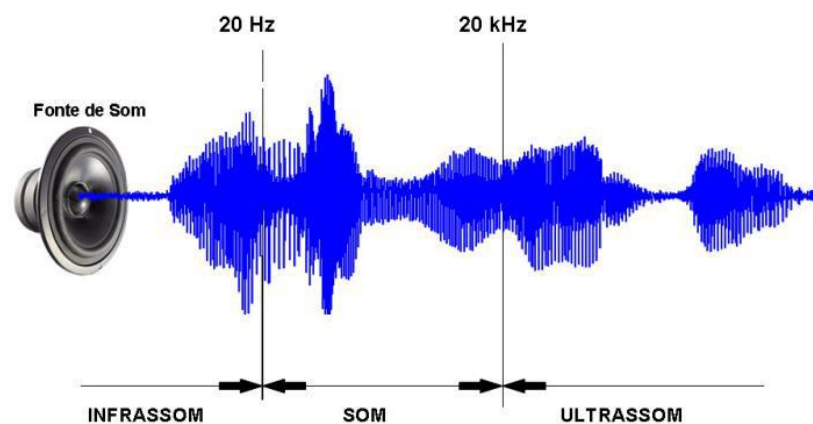
As ondas mecânicas possuem propriedades características que são: difração, dispersão, interferência, reflexão, refração e vibração. Destes, a reflexão e a refração são particularmente importantes para testes ultrassônicos porque, com eles, podem ser detectadas discontinuidades nos materiais.

A reflexão das ondas ultrassônicas ocorre quando o meio, como uma interface aço/ar, muda. Quando as ondas ultrassônicas viajam de um meio para outro, algumas das ondas são refletidas e outras são transmitidas para o outro meio. A quantidade de energia refletida e a quantidade transmitida diretamente dependem da impedância acústica dos materiais, e quanto maior a diferença entre os valores de impedância acústica, mais energia é refletida e menos é transmitida para o próximo meio (SANTIM, 2003).

2.1.7.3 Frequência

As ondas acústicas, ou o próprio som, são classificadas de acordo com frequências e são medidas em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam pelos ouvidos em segundos. A unidade de "Ciclo por segundo" é comumente conhecida como "Hertz", que é a abreviação de "Hz" (ANDREUCCI, 2018). Considera-se 20 kHz o limite superior audível e denomina-se a partir desta, a denominada frequência ultrassônica.

Figura 14 – Campo de audibilidade da vibrações mecânicas



Fonte: Andreucci (2018).

2.1.7.4 Comprimento de onda e frequência

Estas são características importantes em testes de ultrassom. Embora a frequência e o comprimento de onda de cada sensor sejam fixos, essas características determinam qual transdutor é mais adequada para realizar a inspeção, pois quanto menor for o comprimento de onda, menor será o tamanho do defeito encontrado (CORTINES, 2014). Estas são características importantes em ensaios de ultrassom. Embora a frequência e o comprimento de onda de cada sonda sejam fixos, essas características determinam qual sonda é mais adequada para realizar a inspeção, pois quanto menor o comprimento de onda, menor o tamanho do defeito encontrado. Na escolha do transdutor adequado, portanto, deve-se levar em consideração estes fatores. No caso da medição de espessura, quanto maior a frequência melhor a precisão.

2.1.7.5 Acoplantes

A baixa impedância acústica do ar o torna um transmissor ruim de ondas ultrassônicas, e mesmo uma fina camada de ar reflete quase 100% da energia de um pulso ultrassônico que entra nela (ANDREUCCI, 2018).

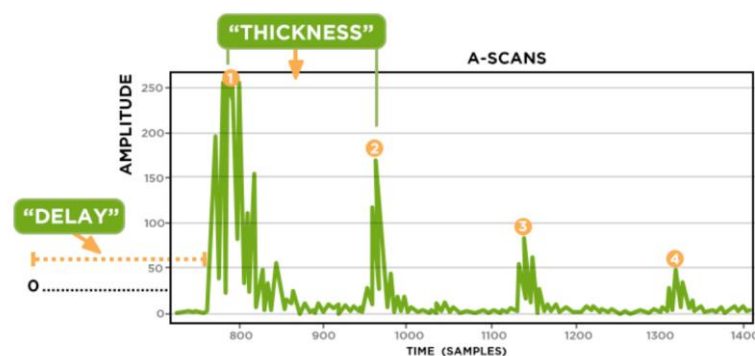
Durante a inspeção de contato direto, a junta deve formar uma película fina entre a superfície da peça e o transdutor para garantir a melhor transmissão possível de ondas ultrassônicas. Ao escolher um elemento de acoplamento, certas características, como rugosidade da superfície e neutralidade química em relação à substância testada, devem ser levadas em consideração. Ligantes mais viscosos devem ser usados em superfícies com rugosidade muito alta (CORTINES, 2014, adaptado).

2.1.7.6 Detector de falhas

O aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais que permitem ao cristal piezoelétrico transmitir, através de um cabo coaxial, uma série de sinais elétricos conectados para serem por ele convertidos em ondas sonoras ultrassônicas. Os sinais captados pelo espelho aparecem no visor tela na forma de pulsos de luz chamados "ecos", que podem ser ajustados em amplitude e posição na tela de saída e se torna o registro das discontinuidades encontradas no material (ANDREUCCI, 2018, adaptado).

O equipamento possui três funções de apresentação dos sinais coletados, sendo eles: A-Scan; B-Scan; C-Scan. Cada tipo apresenta a secção de forma distinta, para delimitação desse projeto, será adotado a opção A-Scan, que plota no visor do equipamento detector de falhas, os ecos de reflexão das ondas mecânicas nas interfaces, segue exemplo na Figura 15.

Figura 15 – Representação A-scan



Fonte: Holub (2021).

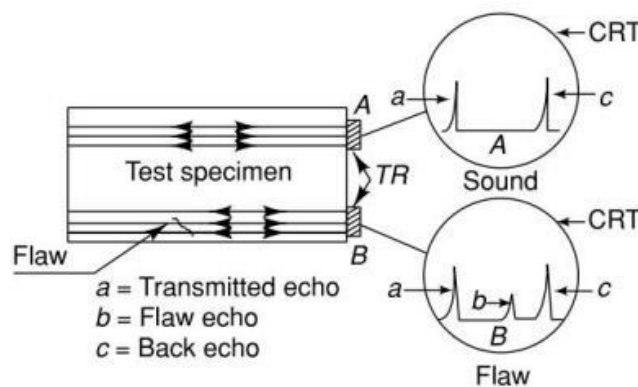
O detector de falhas, independente do modelo ou fabricante, irá possuir algumas funções para calibração do ensaio. Segundo as informações contidas na apostila Abendi (2018), as funções básicas são: Potência de emissão: Está diretamente relacionado à amplitude de oscilação do cristal ou ao tamanho do sinal transmitido; Ganho: Está relacionado com a amplitude do sinal na tela ou amplificação do sinal recebido pelo cristal; Escala: As graduações podem ser alteradas, conforme necessidade do inspetor; Velocidade de propagação: Depende exclusivamente do material e pode ser alterada no equipamento, para ajuste na calibração.

2.1.7.7 Técnicas de inspeção

2.1.7.7.1 Pulso-eco

É uma técnica onde apenas um transdutor é responsável por transmitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material. Assim, o sensor é conectado a apenas um lado do material e pode-se verificar a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização na peça. Portanto, neste teste o transdutor irá emitir as ondas mecânicas a partir de uma das superfícies dos materiais e o mesmo irá atuar tanto como transmissor como receptor da onda refletida. Como visto anteriormente, a onda será refletida a partir da troca do meio, em que ocorre a propagação, e caso seja identificado uma descontinuidade no material, conforme exemplo apresentado na Figura 16 (PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 16 – Sistema Pulso-eco

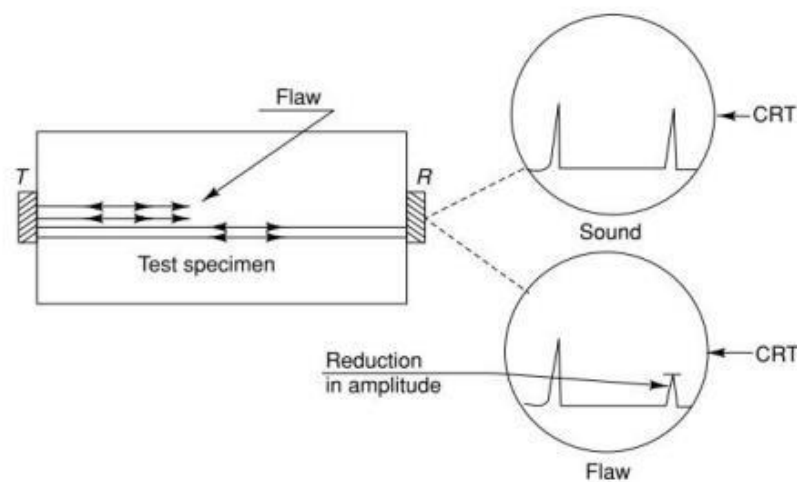


Fonte: Prasad (2011).

2.1.7.7.2 Transmissão

É uma técnica onde são usados dois transdutores separados, um transmitindo e o outro recebendo ondas ultrassônicas. Neste caso, é necessário conectar os sensores aos dois lados da peça para que fiquem perfeitamente alinhados. Com este tipo de inspeção não é possível determinar a localização da descontinuidade, sua extensão ou localização na peça, trata-se apenas de um teste de conformidade (PRASAD, 2011, adaptado).

Figura 17 – Sistema Transmissão



Fonte: Prasad (2011).

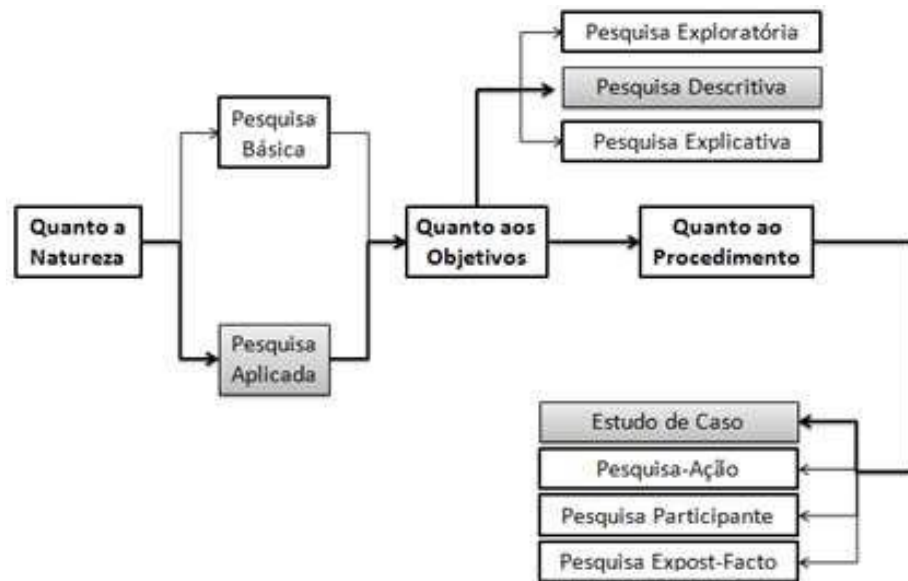
Segundo Prasad (2011), esta técnica é avaliada em termos de perda de energia que a onda ultrassônica sofre, durante a propagação pelo material avaliado, ou seja, uma queda drástica na amplitude de energia apresentada no detector de falhas, revela a presença de descontinuidade no material. Diferente da técnica pulso-eco, a técnica de transmissão proporciona uma boa detecção na superfície de contato, mas a sua principal desvantagem é inabilidade de prover a localização da descontinuidade.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Classificação da pesquisa

O esquema da Figura 18 ilustra o processo utilizado na decisão sobre método de pesquisa utilizado neste estudo.

Figura 18 – Fluxo sobre a escolha da metodologia científica



Fonte: Martis, Mello e Turrioni (2014).

Quanto a Natureza, esta pesquisa objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, portanto é uma Pesquisa Aplicada.

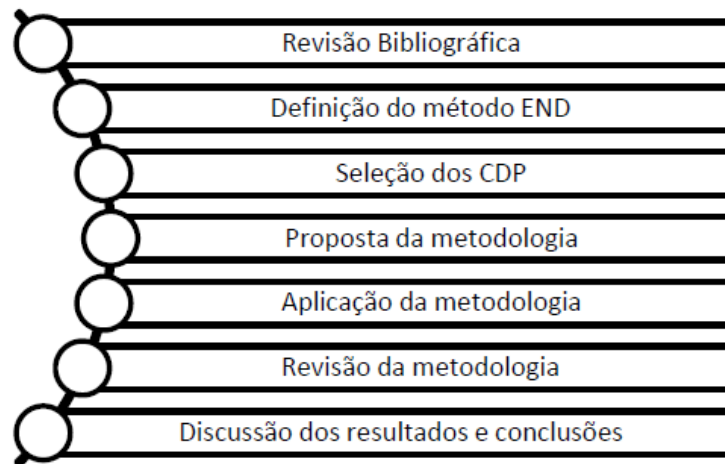
Baseando-se em Martis, Mello e Turrino (2014) quanto aos objetivos, é uma pesquisa descritiva porque visa descrever as variáveis envolvidas na pesquisa e não estabelecer relações de causa e efeito, mas apenas descrever detalhadamente a realidade como fenômeno, embora os resultados possam ser usados na formulação de hipóteses e causas e consequências.

Por fim, quanto ao procedimento, o estudo de caso foi selecionado, pois este estudo busca realizar aplicações para validar as informações obtidas durante a revisão bibliográfica e validar a metodologia proposta.

2.2.2 Roteiro da pesquisa

A Figura 19 apresenta o roteiro que foi seguido neste trabalho.

Figura 19 – Fluxo método da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo o Figura 19, a revisão bibliográfica foi realizada no início, mas continuou durante toda a pesquisa, pois novas informações foram adicionadas ao longo do tempo. Em seguida, foi definido o método de ensaio não destrutivo que seria aplicado durante o desenvolvimento do estudo.

A etapa seguinte foi a seleção dos corpos de prova, o quais seriam inspecionados e caracterizados a partir do END selecionado previamente. Com o conhecimento obtido através da revisão bibliográfica, a metodologia inicial foi proposta, conforme podemos notar no Figura 27. Em seguida, o fluxograma de tarefas propostos foram aplicados nos corpos de prova selecionados.

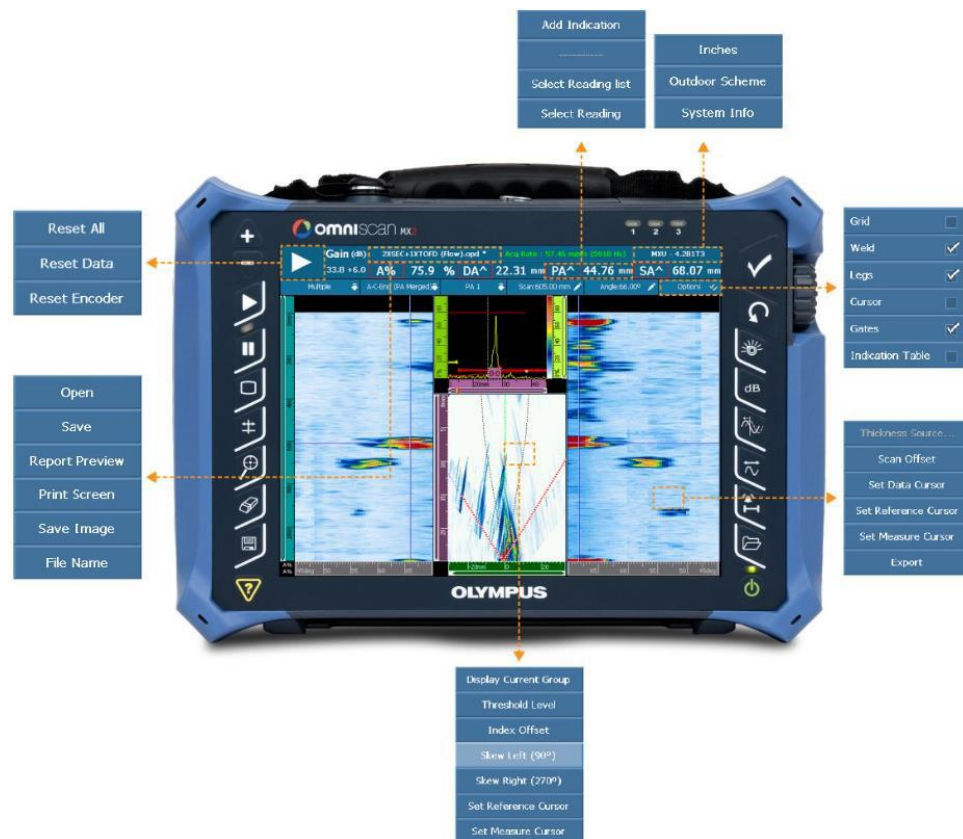
Após a coleta de dados, foi realizada a compilação e análise crítica destas informações, proporcionando assim recursos importantes para revisão da metodologia inicial e obtenção da metodologia final. A partir desta análise, algumas recomendações foram elaboradas, assim como a conclusão e o relatório final.

2.2.3 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para desenvolvimento do estudo, baseiam-se nos conceitos abordados no projeto até esse ponto. Sendo necessário todos os equipamentos para realização do ensaio não destrutivo de ultrassom e os corpos de prova compostos de materiais compósitos e com as estruturas sugeridas, sendo elas: laminados e sanduiche.

O detector de falhas selecionado para desenvolvimento das tarefas de inspeção foi o aparelho OmniScan MX2 do fabricante Olympus, o qual possui uma alta taxa de aquisição de dados e software para inspeções, manuais ou automatizadas. As especificações técnica do equipamento podem ser encontradas no próprio site do fabricante (OLYMPUS, 2023, adaptado).

Figura 20 – Omniscan MX2



Fonte: Olympus (2023)

Ainda para realização do END de ultrassom, se faz necessário cabos específicos para a conexão dos transdutores e detector de falhas, para tal foram selecionados três cabos coaxiais LCM-74-X compatíveis como LEMO 00 e Microdot da fabricante Olympus.

Figura 21 – LCM-74-X



Fonte: Olympus (2023)

Para finalizar os equipamentos complementares para o detector de falhas, os transdutores utilizados para geração das ondas mecânicas, no ensaio de pulso eco, será utilizado uma unidade, V201-RM da empresa OLYMPUS, que possui como especificações técnicas 5MHz de frequência, 0.25” de diâmetro e delay line. Já para o ensaio de transmissão, serão utilizadas duas unidades do transdutor V206-RM da empresa OLYMPUS, que possui especificações técnicas 5MHz de frequência, 0.5” de diâmetro e não será necessário a utilização de delay line. Por fim, serão utilizados 2 transdutores C106 da empresa OLYMPUS, que possui como especificações técnicas 2.25MHz de frequência, 0.25” de diâmetro e não possui delay line. Os boletins técnicos de cada transdutor podem ser encontrados no caminho de internet citados na fonte das Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

Figura 22 – V201-RM



Fonte: Olympus (2023)

Figura 23 – V206-RM



Fonte: Olympus (2023)

Figura 24 – C106



Fonte: Olympus (2023)

Conforme visto na revisão bibliográfica, para a superfície de contato do transdutor e material é necessário a utilização de um acoplante, para este estudo foi selecionado o acoplante Ultragel II da fabricante Magnaflux. O boletim técnico do acoplante pode ser encontrado no próprio site do fabricante.

Por último e não menos importante os corpos de prova selecionados para desenvolvimento do estudo serão baseados em materiais compósitos de fibras de carbonos e ambas as estruturas tanto laminadas quanto sanduíches são compósitos termofixos, ou seja, após a etapa final de cura, independente do processo de fabricação, não podem ter sua geometria alterada, sem acarretar danos estruturais ao corpo de prova.

Para a inspeção em laminado foi selecionado um corpo de prova que possuía oito espessuras diferentes, decorrentes da quantidade de camadas assentadas durante o processo de fabricação. As espessuras variam de 0.90 mm até 7.30 mm. Portanto, esse corpo de prova é composto por diversas camadas de compósito em fibra de carbono, agrupados por resina aglutinante Epóxi, ou seja, quanto mais o número de camadas, maior é a espessura do CDP. O processo de fabricação utilizado neste CDP foi o *Hand lay up*

Figura 25 – CDP laminado

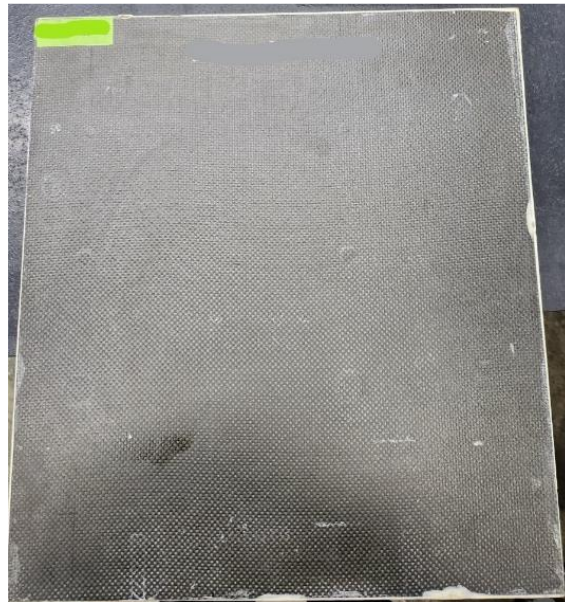


Fonte Elaborado pelo autor

Para a inspeção em sanduíche foram selecionados dois corpos de prova com diferentes colmeias, tanto em sua geometria como em seu material. O primeiro CDP possui uma espessura total de 30.20 mm, ou seja, o laminado superior composto de fibra de carbono e termofixo, resina aglutinante epóxi, colmeia constituída Nomex, que é um papel de aramida com resina fenólica, outra camada de resina aglutinante epóxi e laminado inferior idêntico ao superior, compõem a espessura total. O segundo CDP possui uma espessura total de 19.07 mm, construído com o mesmo perfil laminado do primeiro CDP, fibra de carbono e termofixo, a conexão é realizada utilizando o material aglutinante epóxi, entretanto a colmeia é

constituída de um alumínio ao invés de Nomex. O processo de fabricação utilizados nestes corpos de prova foi o *Hand lay up*.

Figura 26 – CDP sanduíche

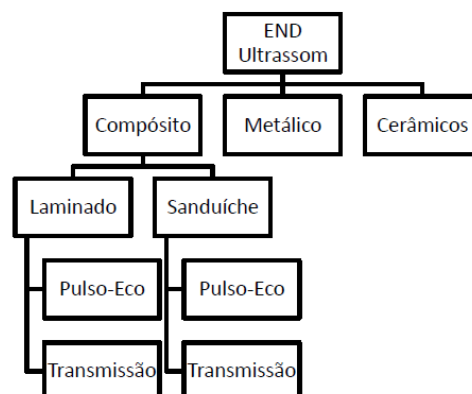


Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.4 Método aplicado

O método aplicado é relevante neste estudo, visto que neste ponto será desenvolvido a metodologia inicial para aplicação do END de ultrassom em um material compósito. A Figura 27 apresenta a ideia inicial da metodologia, antes de ser realizar o estudo de caso para os corpos de prova selecionados previamente.

Figura 27 – Metodologia inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo a Figura 19, o primeiro passo da metodologia seria a definição do material que será analisado, no nosso estudo é o compósito, como citado na subseção anterior, fibra de carbono com uma matriz termofixo. A seguir, é necessário estabelecer o layout que será analisado, podendo ser laminado ou sanduíche, como delimitado anteriormente no documento. Por último, selecionar a técnica de END de ultrassom mais adequada para a aplicação em questão, podendo ser pulso-eco ou transmissão. O ensaio em si, inicia-se com a conexão dos transdutores no cabo coaxial em seguida a conexão do mesmo na entrada P1, feito isso liga-se o equipamento detector de falhas. Com o equipamento ligado, inicia-se a calibração inicial, a qual pode ser realizada selecionando a opção *Mode*, em seguida a opção *Wizard*, neste ponto será solicitado o preenchimento de algumas informações importantes para o ensaio, sendo eles: espessura do material, tipo de material; técnica de ensaio; tipo de onda; transdutor. A partir dessa seleção o equipamento apresenta uma configuração inicial, a qual será ajustada para cada ensaio. No estudo para a calibração inicial foi utilizado a Região 4 do CDP laminado, ou seja espessura 3.50mm, para o tipo de material foi selecionado o compósito, técnica de ensaio pulso-eco, transdutor V206-RM que está cadastrado no próprio detector de falhas, trazendo assim um diâmetro de contato do transdutor de 0.5” e frequência de 5MHz, Referência de amplitude em 80 %, Quantidade de pontos na tela do equipamento de 320 points, número maior que o padrão do equipamento que é 160 e esse ajuste se faz necessário pelo valor da espessura, o retificador de onda é selecionado o HW- que apresenta apenas meia onda e a parte negativa, pois apresenta o sinal como menos ruído que o meia onda positivo, valor de energia aplicado deve ser alterado, como padrão vem em 95 V, entretanto para refinar o sinal da onda, uma vez que será coberto um range de espessuras é necessário alterar para 340 V, a velocidade selecionada para compósito é de 3000 m/s, outro fator importante é o posicionamento do gate, que possui como função a definição de um valor de dB aceitável ou não durante a inpeção, ou seja auxilia, na separação de ruídos e sinais válidos, para este estudo foi definido o gate em 20% dB , este valor é definido em projeto, nesta aplicação está sendo definido este valor , pois representa duas quedas de 6dB, supondo que 80 % seja calibrado para um ganho de 18dB em consequência 40% é 12dB e 20% representa 6dB, este critério filtra os ruído e ainda tem a capacidade de identificar pequenas discontinuidades e o valor inicial de ganho de 45dB é sugerido pela biblioteca do equipamento. Por último, se faz necessário a seleção do tipo A-scan de exibição.

O Quadro 3 apresenta quais funções escolher para cada técnica de ultrassom, somente com essas informações o equipamento já vai se calibrar para os valores citados acima e as modificações propostas devem ser realizadas. Por fim, com o equipamento calibrado basta aplicar o acoplante selecionado sob a superfície de contato do transdutor, e assim iniciar a tarefa de inspeção nas regiões previamente determinadas.

O método de análise dos sinais, será o 6dB para a técnica de pulso-eco, enquanto para a técnica de transmissão o método de análise, para a técnica de transmissão, será o de atenuação.

Quadro 3 – Configuração do Omniscan MX2

Configurações do Omniscan MX2			
Tipo do ensaio	Pulso-eco	Tipo do ensaio	Transmissão
Espessura do material	Depende do CDP	Espessura do material	Depende do CDP
Tipo de material	Composite	Tipo de material	Composite
Técnica de ensaio	Echo Pulse	Técnica de ensaio	Trough Transmission
Tipo de Onda	Logitudinal Wave	Tipo de Onda	Logitudinal Wave
Transdutor	V201	Transdutor	V206 ou C106
Nº de Transdutor	1	Nº de Transdutor	2

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os dados coletados a partir dos ensaios descritos na metodologia inicial, utilizando as duas técnicas citadas, estes serão discutidos e ao final do capítulo será proposto a metodologia revisada, cumprindo assim o último objetivo específico estabelecido no Capítulo 1. Inicialmente será estudado os resultados obtidos para o layout do CDP laminado e em seguida os resultados dos corpos de prova sanduíche.

Conforme apresentado na subsecção 2.2.3, o CDP laminado possui oito formatações de espessura, isso nos possibilita oito diferentes análises. Inicialmente, foi realizado o ensaio de pulso-eco, seguindo as recomendações propostas no método aplicado como velocidade igual 3000 m/s, energia 340 V, ondas longitudinais e apresentação em A-scan. Foi possível detectar as seguintes variáveis para cada região. A Tabela 4 nos apresenta os valores coletados.

Tabela 1 – Parâmetros definidos durante calibração

Parâmetros definidos durante a calibração			
Região	Gain [dB]	Range [mm]	Wedge delay [μs]
1	35.60	4.80	10.25
2	35.60	4.80	10.25
3	39.60	4.80	10.25
4	40.60	4.80	10.25
5	42.60	7.80	10.25
6	45.60	7.80	10.25
7	46.60	7.80	10.25
8	48.60	7.80	10.25

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir destes resultados, já podemos concluir que para a utilização do método 6dB e possibilidade de detecção, o ganho possui uma relação positiva com a espessura, ou seja, quanto maior a espessura sendo inspecionada maior a amplitude ou ganho necessário. Isso é coerente com a teoria abordada, uma vez que cada material possui uma característica de transmissão da onda mecânica e ao longo do percurso o feixe ultrassônico vai perdendo energia, logo quanto maior o percurso sônico maior a energia necessária para atravessá-lo.

A terceira coluna da Tabela 1, apresenta o range utilizado para ensaio do material, apesar de existir mais de uma forma de interpretação das ondas no A-scan, se faz necessário o ajuste do range para garantir o ajuste na tela e só seja possível visualizar um ciclo, ou seja, a tela deve inicial com o pulso inicial e terminar com o eco de fundo, pois a partir do eco de fundo são só reverberações e em decorrência da queda de energia, esses pulso não deve ser utilizados durante um processo de inspeção.

A quarta coluna da Tabela 1, apresenta o *wedge delay* utilizado durante o teste, ele se manteve constante conforme teoria, visto que o valor de 10,25 μs é relacionado com o transdutor que está sendo aplicado, uma vez que os parâmetros de velocidade e energia foram mantidos estáveis esse atraso para início do eco inicial, a fim de evitar a ruídos intrínsecos ao transdutor pode ser mantido não interferindo na análise.

É válido ressaltar que para validação da metodologia, na região 7 havia uma zona de remoção de material, localizada na superfície em que está registrada a notação da região e espessura média da localidade, como é possível notar na Figura 25, com isso realizou-se a inspeção na superfície opostas para analisar o comportamento apresentado no visor do detector de falhas. A Figura 28, apresenta uma região que não possui descontinuidades, que

será considerada como uma região conforme, já a Figura 29 apresenta, os efeitos causados quando todo o feixe ultrassônico está detectando uma descontinuidade no material. Enquanto a Figura 30 nos revela uma região em que parte do feixe ultrassônico está sendo interrompido por uma descontinuidade e outra porção não está podendo assim delimitar a extensão da descontinuidade, conforme sugerido pela revisão bibliográfica.

A partir deste caso, analisando as figuras sugeridas no parágrafo anterior é possível confirmar a capacidade de detecção do método proposto, uma vez que a região conforme se encontra em 80% dB, já quando o transdutor está posicionado acima de um defeito, como por exemplo na Figura 29, a detecção de um pulso maior que o eco de fundo é visível, ou seja todo o feixe ultrassônico está refletido a partir do encontro de uma descontinuidade e ainda temos a profundidade da descontinuidade apresentada no visor, sendo em 5.63 mm, portanto conseguimos detectar o defeito na superfície oposta, podendo delimitá-lo aplicando a marcação com um giz, por exemplo, nas regiões em que o eco no meio do percurso se encontra na mesma amplitude que o eco de fundo, conforme Figura 30, e ainda determinar a profundidade do defeito. Nota-se também que o gate em 20% restringe a leitura dos ruídos durante o percurso ultrassônico da onda.

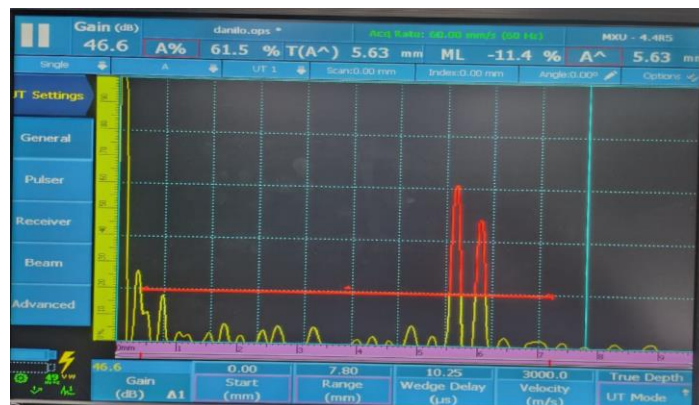
Analisando o diâmetro detectado pelo equipamento sendo de 5.94 mm e no CDP apresentado na Figura 25 a região 7 possui uma espessura 6.15 mm, se deve ao processo de fabricação de compósitos que possuem uma tolerância a variação de espessura um pouco maior, devido ao fato de aplicação de resina entre as camadas, sendo essa aplicação de resina epóxi não necessariamente homogênea em toda superfície do CDP e o processo de cura do CDP que pode ser realizado em autoclave ou em temperatura ambiente, dependendo do processo de fabricação utilizado acarreta em uma não homogeneidade na geometria da superfície.

Figura 28 – Região 7 conforme



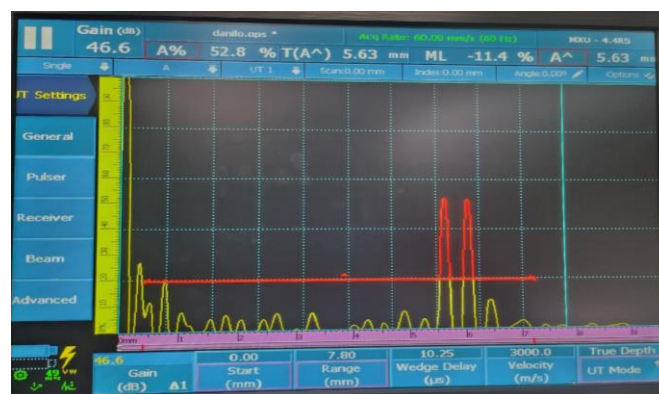
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Região 7 não conforme



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Região 7 delimitações

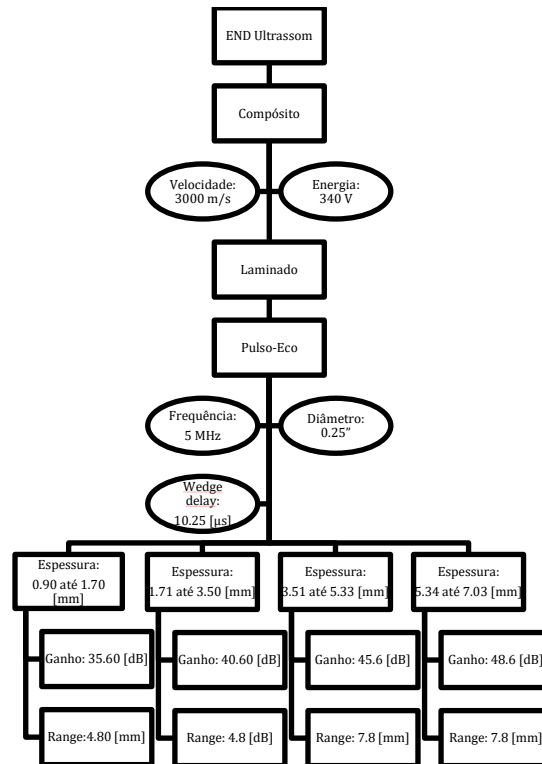


Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, a técnica de transmissão foi utilizada para inspecionar o CDP laminado, porém notou-se a dificuldade de manter os dois transdutores alinhados e os resultados obtidos por muitas vezes não foram precisos, tornando esta técnica mais complexa de execução, acarretando assim na necessidade de uma maior experiência do inspetor para ser realizada. Ademais, nos momentos em que houve a linearidade entre os feixes, os resultados obtidos foram idênticos aos apresentados no pulso-eco, somente a forma de visualização mudou uma vez que na técnica de transmissão só se utiliza um único pulso e este atenua quando detecta alguma descontinuidade no CDP. Dito isso, não se faz necessário a utilização desta técnica em laminados, visto que caso haja um aumento significativo na espessura do material é possível trocar o transdutor diminuindo a sua frequência o que proporciona um maior poder de penetração das ondas mecânicas, sem considerar a dificuldade de realizar manualmente o ensaio de transmissão, tornando assim a técnica de pulso-eco mais adequada para este caso.

Portanto a Figura 31, caracteriza a metodologia sugerida para materiais compósitos laminados.

Figura 31 – Metodologia layout laminado



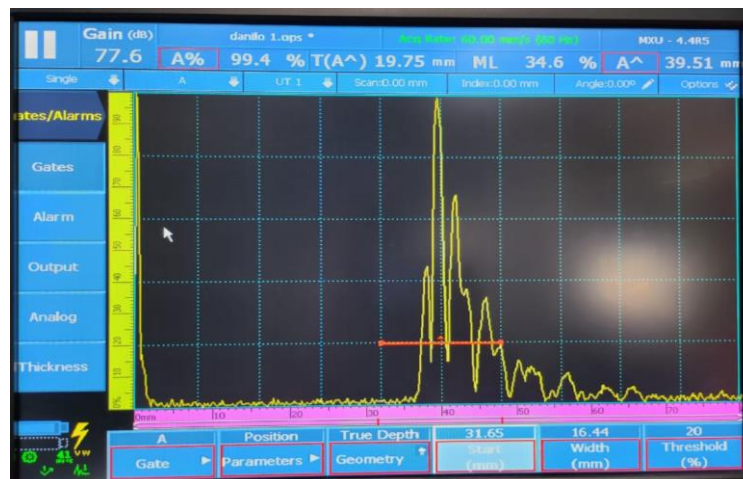
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme apresentado na subsecção 2.2.3, foram utilizados dois corpos de prova para avaliação deste layout um com a espessura de 30.20 mm e núcleo em Nomex e outro com a espessura de 19.07 mm e núcleo em Alumínio. Inicialmente foi aplicada a técnica de pulso-eco para avaliar o CDP com espessura de 30.20 e núcleo em Nomex. O ganho precisou de ajuste, um aumento para 65.6 dB para garantir os 80% de amplitude e a técnica no equipamento também precisou ser alterada para *through transmission*, feito isso notou-se que esta técnica não é mais adequada, visto que a partir do ponto que a feixe atravessa o primeiro laminado e inicia-se o percurso pela colmeia, parte da energia já é refletida de volta ao transdutor outra parte se reverbera pelo espaços vazios da colmeia e outra parcela segue a transmissão pelo Nomex até o próximo laminado acarretando no mesmo efeito, parte da energia ultrassônica vão ser refletidas, ou seja, a perda de energia durante esse processo é incalculável, além de que grande parte da energia sendo energia no primeiro laminado já gera um eco de fundo no visor do detector de falhas tornando impreciso as informações

apresentadas no equipamento, devido a não varredura completa no CDP e sim apenas do laminado em que o transdutor está em contato.

A partir desta conclusão, iniciou-se o ensaio, utilizando a técnica de transmissão com o transdutor V206-RM, sem a utilização do *delay line*, por conta da espessura do CDP, para evitar um sinal ao término do *delay line*. O primeiro resultado está apresentado na Figura 32.

Figura 32 – V206-RM no CDP de 30.20



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da análise deste ensaio, é possível notar nível de ruído neste transdutor, apesar da remoção do *delay line*, uma possível causa para isto é o transdutor ser preparado para a utilização com e sem *delay line*. Entretanto é um sinal válido, passível de avaliação da presença a partir da atenuação do pico de amplitude, os critérios foram mantidos 65.6 dB, 3000 m/s, 340 V, *wedge delay* foi zerado devido a não utilização do mesmo. Com essas informações, decide-se alterar o transdutor do V206-RM para o C106, que é um transdutor com a frequência menor, passou de 5 MHz para 2.25 Mhz, o diâmetro se manteve, consequentemente possui um maior poder de penetração ultrassônica e ainda é transdutor que não é adaptável a utilização do *delay line*.

Com a alteração o sinal ficou mais “limpo”, onde tivemos uma amplitude de onda com menos ruído, facilitando a análise do sinal. A Figura 33, apresenta a leitura do transdutor C106 no CDP com espessura de 30.20 mm com núcleo Nomex. Outro fator relevante é a redução no valor do ganho em decorrência da troca de transdutor, esta redução é esperada a partir da revisão bibliográfica visto que um menor comprimento de onda, neste caso de 5MHz para 2.5 MHz, acarreta um maior poder de penetração nas ondas ultrassônicas, com isso,

inicialmente foi necessário um *gain* de 65.6 dB e após a atualização o ganho caiu para 44.3 dB, já o Range se manteve estável nas duas configurações.

Figura 33 – C106 no CDP de 30.20



Fonte: Elaborado pelo autor

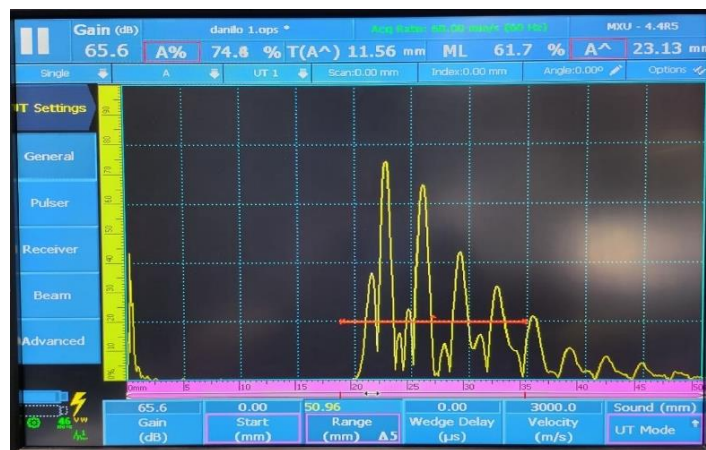
Por fim, a seleção do transdutor C106 se fez mais coerente e iniciou-se a avaliação do outro CDP com espessura de 19.07. Para isso, inicialmente os parâmetros foram mantidos, porém imediatamente se fez necessário reajustar os parâmetros, onde o *gain* foi ajustado de 44.5 dB para 65.6 dB e o range 59.61 mm, notou-se ainda uma reverberação das ondas e não foi possível estabilizada como podemos observar na Figura 34. A justificativa é a diferença da composição da colmeia dos CDP, visto que a partir do primeiro CDP a velocidade de transmissão de 3000 m/s se mostrou consistente e permitiu a utilização do mesmo, entretanto para o segundo corpo de prova com o núcleo de Alumínio que segundo a literatura possui uma velocidade 6300 m/s, um pouco mais de duas vezes o valor de transmissão do compósito, acarreta na reverberação muito mais rápida, isto dificulta a interpretação dos sinais, mas não invalida o teste e pode ser ajustada a velocidade no detector de falha para a velocidade de 6300 m/s estabilizando assim os sinais coletados a partir do ensaio. Logo, a velocidade decorrente do material do núcleo da colmeia é relevante e deve ser avaliada durante a fase de calibração do equipamento.

O mesmo desafio citado na avaliação do laminado, foi identificado neste ensaio também, que é a dificuldade de manter a linearidade dos transdutores, como podemos notar na Figura 35, logo é possível compreender o motivo de usualmente esta técnica ser automatizada e ser realizada por robôs via programação, por isso a importância de uma boa calibração antes de iniciar o processo de inspeção, principalmente nesta técnica, caso seja feita uma calibração eficiente, qualquer perda de linearidade entre os transdutores, será

passível de atenuação e nesta situação pode ser interpretado como uma perda de linearidade e não uma atenuação por descontinuidade que seria uma análise incorreta da situação. Logo, é possível concluir que caso ocorra uma calibração incorreta do equipamento, as perdas de linearidade entre os feixes, pode ser interpretada como um falha em decorrência disso a experiência do inspetor é relevante para aplicação da técnica.

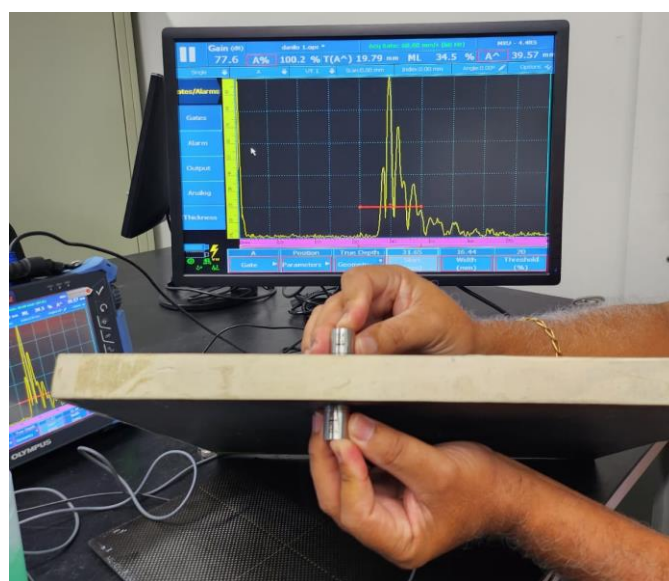
Os ensaios comprovam ainda a limitação desta técnica que é a não possibilidade de identificar a profundidade do defeito, ou seja, é possível delimitar as fronteiras das descontinuidades, entretanto não é possível coletar a profundidade que se encontra o defeito.

Figura 34 – C106 no CDP de 19.02



Fonte: Elaborado pelo autor

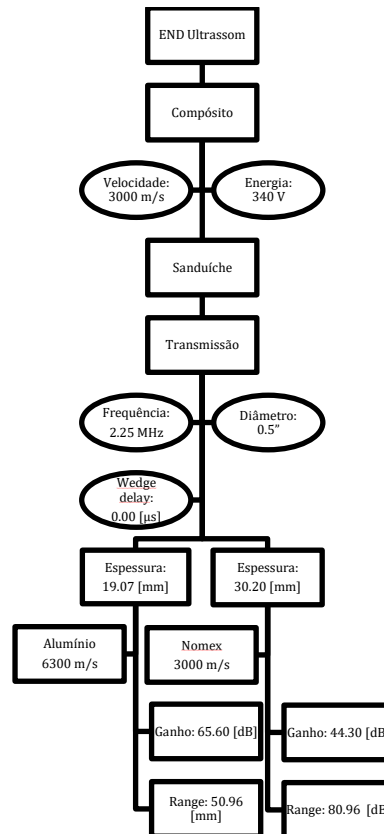
Figura 35 – Técnica de transmissão



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto a Figura 36 caracteriza a metodologia sugerida para materiais compósitos sanduíche.

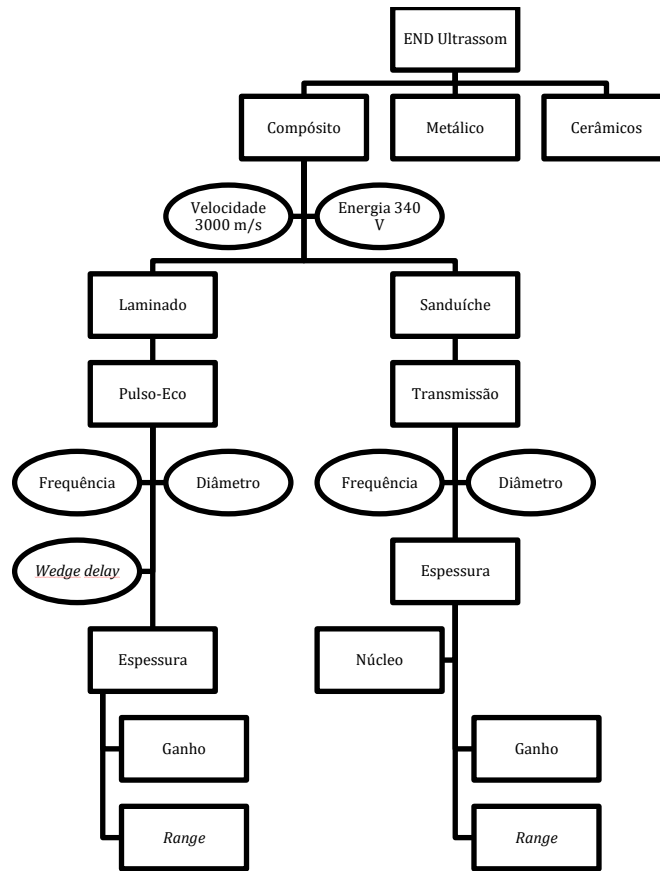
Figura 36 – Metodologia layout sanduíche



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados obtidos através da Figura 35 e Figura 36, onde na Figura 35 foi apresentado os critérios relevantes para o ensaio não destrutivo em ultrassom aplicado sobre uma placa laminada, tendo como critérios velocidade do material, energia aplicada na geração das ondas mecânicas, frequência do transdutor, diâmetro do transdutor, presença ou não do delay line, ganho, range e wedge delay. Já na Figura 36, foi definido os critérios importantes para inspeção de um painel sanduíche, notando-se a inclusão da avaliação da velocidade do material de composição do núcleo da colmeia e a não necessidade de delay line nesta técnica. Cada estrutura apresentada, resultou em um fluxograma específico, realizando a união destas é possível propor uma metodologia que engloba os dois layouts compostos de materiais compósitos apresentando as características relevantes para calibração do equipamento e realização do experimento. Logo, a Figura 37 apresenta a metodologia final.

Figura 37 – Metodologia final



Fonte: Elaborado pelo autor

3 CONCLUSÃO

A partir das discussões dos resultados obtidos através da subseção 2.3, foi possível concluir que o ultrassom é um ensaio não destrutivo eficiente para avaliação de integridade dos materiais, mas que é muito importante a definição dos parâmetros corretos de calibração e execução do ensaio, visto que algum erro presente nestes podem acarretar sinais e leituras equivocadas quanto a presença ou não de descontinuidades do material. Com o estudo foi possível determinar para componentes laminados a técnica de pulso-eco é a mais indicada e que para componentes sanduíche a técnica de transmissão se faz necessário, pois conforme avaliado na subseção 2.3 a técnica pulso-eco envia e recebe o sinal no mesmo transmissor e essa reflexão ocorre na mudança no meio de transmissão, devido a isso não é efeito na compósito, pois a reflexão ocorreria assim que a ondas propagassem do laminado para a colmeia, acarretando na imprecisão do sinal, já o de transmissão não ocorreria este efeito pois os transdutores exercem apenas um papel de cada vez e o sinal é avaliado conforme a atenuação de energia, mas também conclui-se que a técnica de transmissão não é o ideal para laminados no *range* de espessura estudado pois o eco inicial e o eco final ficam muito próximos impossibilitando a leitura e análise do sinal coletado. Entretanto, conclui-se que a técnica de transmissão apresenta desafios na sua execução, dependendo muito do fator experiência do inspetor, sendo assim uma técnica que a recomendação seja a aplicação dela de forma automatizada. Por fim, conclui-se que os ensaios não destrutivos são relevantes para análise de componentes aeronáuticos, de modo que possibilitam a avaliação de integridade, sem acarretar danos ao corpo de prova, mas notou-se também que os END são complementares, em certas ocasiões sendo necessários mais de um método para confecção de um laudo e ainda são específicos para cada situação, ou seja é o papel do engenheiro avaliar o material a ser inspecionada, definir o método mais eficiente ou os métodos e estabelecer o parâmetros necessários para garantir uma interpretação correta dos resultados.

Ao final deste trabalho de graduação, vale relembrar e observar o cumprimento dos objetivos específicos propostos, que foram a força motriz para alcançar o objetivo geral desta pesquisa. Assim, apresentam-se as conclusões da análise dos dados e a discussão dos resultados obtidos, partindo de cada um dos objetivos específicos. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

3.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

Em conformidade ao primeiro objetivo específico que propõe o mapeamento dos ensaios não destrutivos em materiais compósitos, o estudo iniciou-se com uma introdução em materiais compósitos e a importância deles em uma indústria aeronáutica, logo em seguida mapeou os ensaios não destrutivos “clássicos” e evidenciou quais eram aplicáveis em materiais compósitos.

O segundo objetivo específico visa determinar o método para realização de ensaios não destrutivos em compósitos laminares e sanduíche, e para tal o ensaio de ultrassom foi o selecionado e aprofundado para inspeção e caracterização dos materiais compósitos em seus layouts.

Ainda o terceiro objetivo buscava desenvolver uma metodologia para aplicação de ensaios não destrutivos em compósitos laminares e sanduiche, esta metodologia foi desenvolvida através da revisão bibliográfica e conjunto com o estudo de caso de alguns corpos de prova, validando a metodologia proposta.

A partir do alcance de todos os objetivos específicos, o que permitiu atender o objetivo geral deste estudo de mapear e identificar quais são os ensaios não destrutivos indicados para avaliação e caracterização dos materiais compósitos laminados e compósitos sanduíches utilizados em componentes aeronáuticos. O estudo ainda se estendeu até o desenvolvimento de uma metodologia para aplicação do ensaio não destrutivo de ultrassom. Entretanto, é possível concluir deste estudo, apesar de o ultrassom ser um dos ensaios aplicado para estas condições, existem outros que complementam e serão necessário para inspeção e caracterização de componentes aeronáuticos.

3.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que foi abordado o END de ultrassom é válido sugerir a análise da aplicação do END de radiografia ou até mesmo novos métodos de ensaios não destrutivos em compósitos laminados e sanduíche. Outra sugestão é avaliar ainda mais corpos de prova, aumentando a variedade de espessuras e *layouts*. Por último, uma sugestão seria utilizar o próprio ensaio abordado em outra composição de compósito, podendo ser fibra de vidro ou até mesmo em materiais termoplásticos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **ANAC IS Nº 145.163-001A**: Informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Brasília: ANAC, 2013.

ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom: aplicação industrial. **Associação brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção**, São Paulo, Brasil, v.1, p. 1-105, jun. 2018.

Disponível em:

https://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_us_2018.pdf. Acesso em: 15 Dez 2022

CORTINES, V. J. **Estudo da inspeção e caracterização de materiais compósitos por ultrassom**. 2014. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

DJORDJEVIC B. B. Nondestructive test technology for the composite. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SLOVENIA SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING, 10, 2009, Ljubljana. **Proceeding** [...]. Ljubljana: ASNT, 2009. p. 261-265.

GHOLIZADEH, S. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *In*: PORTUGUESE CONFERENCE ON FRACTURE, 15, Paço de Arcos. **Proceeding** [...]. Paço de Arcos: ELSEVIER, 2016. p. 50-57.

HOLUB, Q. Unpacking a scans, b scans and c scans in robotic ultrasonic inspection. *In*: GECKO ROBOTICS. **Blog Gecko Robotics**. Pittsburgh, 29 set. 2021. Disponível em: <https://blog.geckorobotics.com/unpacking-a-scans-b-scans-and-c-scans-in-robotic-ultrasonic-inspection>. Acesso em: 05 Jan 2023.

LOCKARD, C. D. **Anomaly detection in radiographic images of composite**. Thesis (Master of Arts in Interdisciplinary Computer Science) – Mills College, Spring, 2015.

MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em engenharia de produção**. São Paulo, SP: Atlas, 2014.

MAZLAN, Norkhairunnisa *et al.* **Advanced composites in aerospace engineering applications**. Cham: Springer 2022. v. 1, p. 283 – 301, 2022.

OLYMPUS NDT. **Site institucional do fabricante**. Disponível em: <http://www.olympus-ims.com>. Acesso em: 10 jan. 2023.

PRASAD J.; NAIR, C. G. K. **Non-Destructive test and evaluation of materials**. 2nd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2011.

SANTIN J. L. **Ultra-som: técnica e aplicação**. 2. ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.