

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E MANUFATURA

VINICIUS DIAS

**EMPREGO DE TÉCNICAS DE ULTRASSOM NA
CARACTERIZAÇÃO DE DANOS E DEFEITOS EM MATERIAIS
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS DE MATRIZ POLIMÉRICA E
LAMINADOS HÍBRIDOS FIBRA-METAL**

São Carlos

2016

VINICIUS DIAS

EMPREGO DE TÉCNICAS DE ULTRASSOM NA
CARACTERIZAÇÃO DE DANOS E DEFEITOS EM MATERIAIS
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS DE MATRIZ POLIMÉRICA E
LAMINADOS HÍBRIDOS FIBRA-METAL

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia de Materiais e Manufatura,
da Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo
Tarpani

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D541e Dias, Vinicius
 Emprego de técnicas de ultrassom na caracterização
de danos e defeitos em materiais compósitos estruturais
de matriz polimérica e laminados híbridos fibra-metal /
Vinicius Dias; orientador José Ricardo Tarpani. São
Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. Ensaio não-destrutivo. 2. Ultrassom. 3.
Compósito laminar. 4. Surlyn. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder cada conquista e me auxiliar em cada dificuldade durante a minha vida.

A toda minha família por todo o apoio em cada decisão que decidi tomar e seguir durante esta caminhada.

Agradecimento especial para minha namorada Camila Silvestre por nunca deixar de me apoiar, sempre me aconselhando em cada momento.

Ao professor José R. Tarpani pelos conselhos, orientações e amizade, além de todo o apoio que precisei durante as pesquisas e o curso.

Aos alunos Gualter, Brian, Francisco, Gustavo e Karen pelo empenho em cada momento em que precisei de suporte durante os trabalhos.

A todos os técnicos do departamento pela ajuda na operação de equipamentos.

RESUMO

Dias, V. **Emprego de Técnicas de Ultrassom na Caracterização de Danos e Defeitos em Materiais Compósitos Estruturais de Matriz Polimérica e Laminados Fibra-Metal**. 2016. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Ultrassom foi utilizado para inspecionar defeitos e danos inseridos em laminados compósitos reforçados com fibras contínuas de carbono imersas em matriz de resina epóxi aderidas por um copolímero ionomérico termoplástico de etileno-ácido metacrílico (Surlyn 8940 da Dupont®) como projeto de iniciação científica, realizado no laboratório de materiais compósitos e ensaios não-destrutivos do SMM-EESC.

Foi realizado um roteiro técnico com intuito didático a fim de organizar um material para posteriores projetos, no qual realizamos diversas análises ultrassônicas em diferentes tipos de materiais. Esse material constitui de calibração do aparelho e análise de diferentes defeitos simulados em materiais metálicos e compósitos.

O avanço nas pesquisas foi realizado pela caracterização da técnica de ultrassom em laminados híbridos fibra-metal conhecidos como GLARE (Glass Reinforced Fiber Metal/Laminate), sob impacto balístico, para aplicações espaciais.

Palavras-chave: Ensaio não-destrutivo; ultrassom; compósito laminar; Surlyn.

ABSTRACT

Dias, V. Use of Ultrasound Techniques in Damage and Defects Characterization in Polymer Matrix Structural Composite Materials and Fiber-Metal Laminates.

2016. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Ultrasound was used to inspect defects and damage inserted into composite laminates reinforced with carbon fiber continuous immersed in epoxy resin matrix adhered by a thermoplastic ionomer copolymer of ethylene methacrylic acid (Surlyn 8940 from Dupont®) for initiation scientific project carried out in the composite materials and non-destructive testing laboratory of SMM-EESC.

A technical didactic guide was performed in order to arrange a material for future projects which carried out several ultrasonic analyses in different types of materials. This material is composed of instrumental calibration and analysis of different simulated defects in metal and composite materials.

Advanced in research was conducted by the characterization of ultrasound technique in fiber-metal hybrid laminate known as GLARE (Glass Reinforced Fiber Metal/Laminate) under ballistic impact for space applications.

Keywords: Nondestructive testing; ultrasound; composite laminate; Surlyn.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura e camadas do FML.....	14
Figura 2 - Processo de manufatura RIFT.	15
Figura 3 - Princípio Básico de Inspeção por Ultrassom.....	17
Figura 4 - Efeito Piezelétrico.	17
Figura 5 - Medidas do bloco V1 norma DIN 54120.	19
Figura 6 - Bloco padrão para calibração em compósito.....	19
Figura 7 - Dimensões reais do bloco padrão de compósito.....	20
Figura 8 – Bloco de alumínio para calibração de GLARE.....	20
Figura 9 - (a) Equipamento de Ultrassom Olympus® Epoch 600. (b) Transdutor V202 de 10MHz. (c) Transdutor DL4R de 4MHz.....	21
Figura 10 - Estrutura final dos corpos de prova.	22
Figura 11 - EMIC™ modelo DL 10000.....	23
Figura 12 - Ensaio de flexão pura.	23
Figura 13 - Calibração em 1mm de espessura.....	24
Figura 14 - Calibração em 8mm de espessura.....	25
Figura 15 - Placa Compósita de 2.80mm.	26
Figura 16 - Ensaio por ultrassom em compósito.....	26
Figura 17 – Estrutura do compor de prova compósito/Surlyn ensaiada.....	27
Figura 18 – Ensaio realizado no corpo de prova compósito/Surlyn.....	27
Figura 19 - Superfície Posterior da Placa Compósita Trincada.	28
Figura 20 - Ensaio realizado no ponto 1.	28
Figura 21 - Ensaio realizado no ponto 2.	29
Figura 22 - Superfície Superior da Placa Compósita Trincada.	29
Figura 23 - Ensaio realizado no ponto 3.	30
Figura 24 - Ensaio realizado no ponto 4.	30
Figura 25 - Identificação do eco de fundo de 1.55 mm.....	31
Figura 26 - Calibração da espessura de 1.55 mm.....	32
Figura 27 - Identificação do eco de repetição de 3.10 mm.	32
Figura 28 - Calibração da espessura de 3.10 mm.....	33
Figura 29 - Placa de GLARE verde.	34
Figura 30 - Ensaio de Ultrassom em GLARE verde.....	34
Figura 31 - Eco referente à fibra de vidro.	35
Figura 32 - Eco de fundo do GLARE.	35
Figura 33 - GLARE sob impacto balístico.....	37
Figura 34 - Defeito encontrado a 0.8 mm da superfície do GLARE.....	37
Figura 35 - Defeito encontrado a 0.95 mm da superfície do GLARE.....	38
Figura 36 - (a) Análise da vista lateral. (b) Análise da seção do corpo de prova.....	39
Figura 37 - Identificação do eco de fundo da menor espessura.	40
Figura 38 - Calibração da menor espessura.....	40
Figura 39 - Identificação do eco de fundo da maior espessura.	41
Figura 40 - Calibração da maior espessura.	41
Figura 41 - Verificação da espessura dos blocos metálicos.....	42

Figura 42 - Desenho 2D do CP 1.	43
Figura 43 - Ensaio de US realizado na superfície superior do CP 1.	43
Figura 44 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 1.	44
Figura 45 - Desenho 2D do CP 2.	44
Figura 46 - Ensaio de US realizado na superfície superior do CP 2.	45
Figura 47 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 2.	45
Figura 48 - Desenho 2D do CP 3.	46
Figura 49 - Ensaio de US realizado no ponto 1 do CP 3.....	46
Figura 50 - Ensaio de US realizado no ponto 2 do CP 3.....	47
Figura 51 - Ensaio de US realizado no ponto 3 do CP 3.....	47
Figura 52 - Ensaio de US realizado no ponto 4 do CP 4.....	48
Figura 53 - Desenho 2D do CP 4.	48
Figura 54 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 4.	49
Figura 55 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 4.	49
Figura 56 - Desenho 2D do CP 5.	50
Figura 57 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 5.	50
Figura 58 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 5.	51
Figura 59 - Calibração da menor espessura.....	52
Figura 60 - Calibração da maior espessura.	52
Figura 61 - Modelo das peças compósitas ensaiadas.	53
Figura 62 - Representação em 2D das peças compósitas.....	53
Figura 63 - Ensaio de US identificando o primeiro defeito.	54
Figura 64 - Ensaio de US identificando o segundo defeito.	54
Figura 65 - Ensaio de US realizado no CP 02.....	55
Figura 66 - Ensaio de US realizado no CP 03.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Compósitos Laminares	13
2.2 RIFT	15
2.3 Danos e Defeitos	15
2.4 Técnicas de Ultrassom	16
2.4.1 Efeito Piezelétrico	17
2.4.2 Técnicas de Inspeção por Ultrassom.....	18
2.4.3 Surlyn 8940 Dupont®	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 Calibração e Equipamentos para Análise por Ultrassom	18
3.2 Confecção dos Laminados Compósitos e Lâminas de Surlyn.....	21
3.3 Ensaio de Flexão.....	22
3.4 Glare-5.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Calibração em Compósito	24
4.2 Resultados de Ultrassom em Compósitos	25
4.2.1 Compósito sem Adesão.....	25
4.2.2 Compósito com Adesão	27
4.2.3 Compósito Aderido Submetido a Ensaio de Flexão.....	28
4.3 Calibração em GLARE	31
4.4 Resultados de Ultrassom em GLARE.....	33
4.4.1 GLARE Verde.....	33
4.4.2 GLARE sob impacto balístico.....	36
4.5 Ensaio de Ultrassom em Metais	39
4.5.1 Método de Calibração	39
4.5.2 Método Experimental	42
4.6 Ensaio de Ultrassom em Compósitos Fibra de Carbono	51
4.6.1 Método de Calibração	51
4.6.2 Método Experimental	52
5. CONCLUSÃO	56
6. REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de tecnologia, com destaque para as responsáveis pelos setores de engenharias (aeronáutica, automobilística, eletrônica, etc.), necessitam inspecionar seus componentes sem que isso prejudique seu uso subsequente. Os ensaios não-destrutivos (END) foram desenvolvidos para esse fim, realizando uma análise qualitativa do material, sem prejudicar sua aplicação posterior. Esses ensaios têm como principal fator a diminuição dos custos de reparo de peças, além de fornecer alto nível de confiança nos resultados.

A técnica de Ultrassom (US) é um método de detecção de descontinuidades, onde se utiliza um transdutor, de diferentes frequências, para emitir ondas mecânicas no interior de um material. Assim como as ondas sonoras, essas ondas ultrassônicas refletem-se ao incidir em um anteparo qualquer, detectando um corpo diferente ao da estrutura ensaiada.

Para garantir a confiabilidade dos ensaios, é necessário calibrar o equipamento para o material ensaiado, onde duas espessuras diferentes do material são utilizadas para esta tarefa. Portanto, além da determinação de descontinuidade, essa técnica nos auxilia na determinação da espessura da peça.

O presente relatório tem como objetivo relatar as atividades desempenhadas no Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura (SMM-II) da Escola de Engenharia de São Carlos da USP (EESC – USP).

O trabalho consiste em caracterizar danos através de ultrassonografia como técnica de *NDT* (*Nondestructive Testing*) em laminados compósitos estruturais de fibras de carbono e matriz polimérica, laminados fibra-metal impactados (fibras de vidro e alumínio), e blocos de aço, além de conter um roteiro descritivo de calibração e utilização dos equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos Laminares

Compósitos laminares sólidos são materiais compostos por dois elementos funcionando em conjunto, adquirindo propriedades diferentes desses elementos trabalhando individualmente. Esses materiais consistem em um material base (matriz) e um reforço de determinado tipo (fibrosos), oferecendo aumento de força e rigidez à matriz. O reforço aparece normalmente como fibras enquanto que a matriz aparece normalmente como resina [1][2].

As propriedades desses materiais são determinadas pelos seguintes aspectos:

- Propriedades das fibras
- Propriedades da resina
- Razão entre esses elementos no material
- Geometria e orientação das fibras no material

A matriz é a fase responsável por transmitir e distribuir às fibras os esforços no qual o material está sendo solicitado. Dessa forma, uma boa adesão entre a matriz e o reforço assegura que as forças são distribuídas de forma eficiente, o que previne a fratura ou deslocamento das fibras quando o material é solicitado [1][2].

A utilização de materiais compósitos em aeronaves começou no final dos anos 1950, onde as fibras de vidro já começaram a ser usadas como material de estrutura primária em planadores. Alguns benefícios como resistência à fadiga, melhor rigidez e diminuição de peso, foram adquiridos pela utilização de compósitos na indústria aeronáutica em substituição ao alumínio, além de permitir design aerodinâmico extremamente suave auxiliando componentes de estruturas curvas complexas.

A construção de componentes em compósitos também vem acompanhada de desvantagens, dos quais podemos citar, como mais importante, a falta de pontos visuais originadas por danos provocados na fuselagem de aeronaves, diferentemente do alumínio, no qual um dano sofrido nessa estrutura reflete na marca visual.

Na tentativa de buscar novos materiais para a indústria aeronáutica, a Universidade de Delft, Holanda, desenvolveu pesquisas envolvendo materiais híbridos,

chegando aos materiais conhecidos como FML (Fibre-Metal Laminates), constituídos por camadas finas de alumínio e compósitos (Figura 1).

A combinação desses materiais auxilia na redução da propagação de trincas criadas na superfície da lâmina, propagando-se até a próxima camada apenas, impedindo a fratura completa desse material.

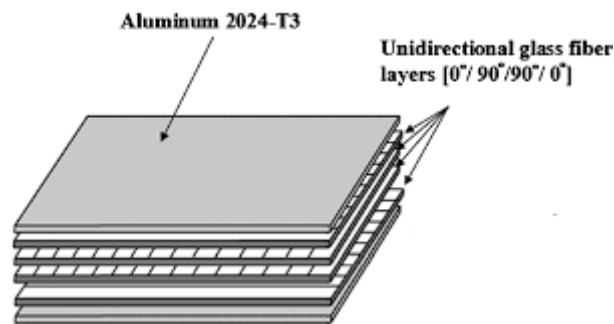


Figura 1 - Estrutura e camadas do FML.

As principais propriedades desses materiais são:

- Baixo peso específico;
- Alta resistência mecânica;
- Boa tolerância à danos;
- Resistência à corrosão;
- Resistência à fadiga;
- Alta resistência ao impacto;
- Isolante térmico

Dentre os FML's conhecidos e desenvolvidos está o GLARE (*Glass Reinforced Fiber Metal/Laminate*) constituído de lâminas de alumínio em combinação com compósitos de vidro/epóxi. Esses materiais foram desenvolvidos com o intuito de melhorar a vida em fadiga de estruturas aeronáuticas e, posteriormente, observou-se o desempenho elevado ao impacto que eles possuíam. Devido a essas características, o GLARE é um material aceito para utilização em fuselagem de aeronaves.

2.2 RIFT

RIFT (Resin Infusion on Flexible Tooling) consiste em um método de manufatura de laminados compósitos com resina líquida de alta qualidade e com baixa quantidade de imperfeições. Nesse processo, as fibras secas são dispostas umas sobre as outras com orientação pré-estabelecida, sendo então cobertos com diferentes tecidos. É então aplicado vácuo para que todo o ar presente nos fabricados seja removido e, em seguida, é inserida a resina, impregnando-a nos componentes. A cura da resina ocorre à temperatura e condições ambientes, por aquecimento do molde ou por inserção de todo o conjunto em autoclave. A Figura 2 mostra um modelo esquemático desse método [3][4].

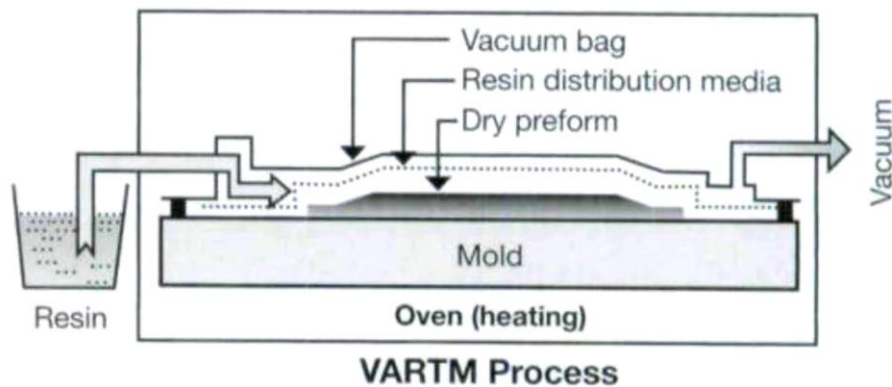


Figura 2 - Processo de manufatura RIFT.

2.3 Danos e Defeitos

Os danos normalmente encontrados nos laminados compósitos podem ocorrer tanto na fabricação do laminado, quanto durante sua solicitação e uso. Os principais danos e defeitos que ocorrem nos laminados estão listados a seguir [5].

- Porosidades
- Corpos estranhos
- Delaminações
- Cura incompleta da resina
- Regiões ricas e pobres em resina

- Trincas
- Empilhamento incorreto das fibras

2.4 Técnicas de Ultrassom

As ondas mecânicas se propagam no meio através da oscilação elástica de seus átomos em torno de sua posição de equilíbrio. A forma de oscilação dos átomos determina o modo de propagação das ondas ultrassônicas, sendo duas formas mais importante [6]:

- Ondas Longitudinais: Representa o modo mais comum de transmissão de ondas sonoras. Nesse tipo de onda ultrassônica, zonas de compressão são produzidas pela vibração das partículas paralelamente à direção de propagação da onda.
- Ondas Transversais: Nesse tipo de onda, a partícula se desloca transversalmente em relação à direção de propagação. Cada partícula deve estar fortemente ligada aos seus vizinhos para assim, se moverem como uma única partícula.

No ensaio por ultrassom, o feixe sônico é introduzido no material através de um transdutor (cabecote) contendo um cristal piezelétrico, acoplado ao aparelho, com a finalidade de detectar qualquer tipo de descontinuidade, tanto internas quanto sub-superficiais. O feixe, encontrando uma descontinuidade no interior do material inspecionado, é dividido em dois componentes: parte é transmitida e parte é refletida pelas interfaces presentes na sua estrutura. O feixe refletido retorna ao transdutor, que capta esse sinal e gera um pico de energia no aparelho. Um terceiro sinal corresponde à energia transmitida através da descontinuidade, que reflete na interface posterior do material inspecionado (eco de fundo), representado na Figura 3 [7].

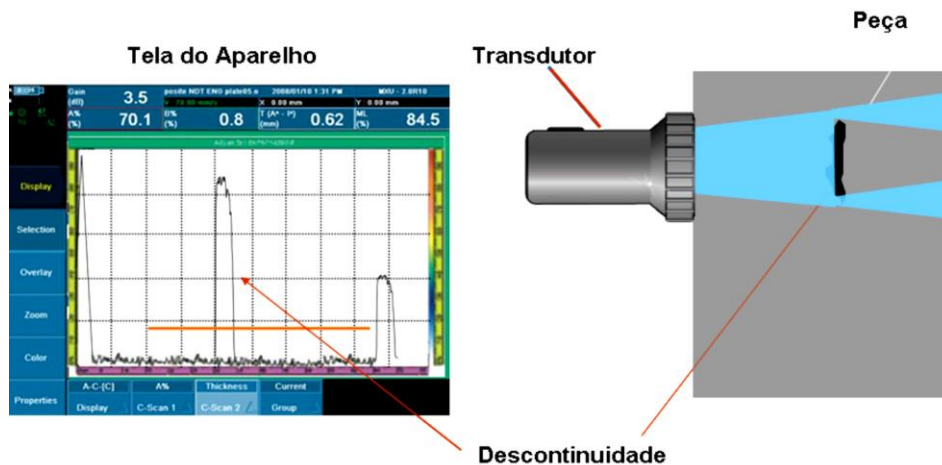


Figura 3 - Princípio Básico de Inspeção por Ultrassom [7].

2.4.1 Efeito Piezométrico

O efeito piezométrico (Figura 4) é um fenômeno apresentado por alguns materiais que caracteriza a sua capacidade de se expandirem ou comprimirem quando sujeitos a um campo elétrico. Da mesma forma, o efeito ocorre devido a uma força mecânica externa aplicada, gerando cargas elétricas na sua superfície oposta [7][8].

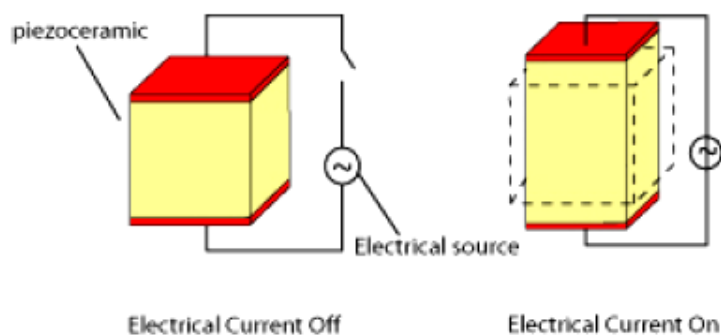


Figura 4 - Efeito Piezométrico [7].

Os materiais piezométricos são comumente encontrados na forma de cristais (como quartzo, por exemplo) e faz parte do componente denominado transdutor, responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material [6][7][9].

2.4.2 Técnicas de Inspeção por Ultrassom

A técnica de ensaio por ultrassom mais utilizada é denominado “pulso-eco”, onde um único transdutor é acoplado ao material, transmitindo e recebendo pulsos de energia sônica introduzidos no material. Quando o feixe encontra alguma descontinuidade, parte dela é refletida para o transdutor e parte é transmitida. A onda que retorna ao transdutor é convertida em energia elétrica (efeito piezelétrico), transformando-a em sinal (pico), observado na tela do aparelho [6].

A frequência de ensaio normalmente utilizada varia de 2 a 10 MHz, além da necessidade de calibração do aparelho em função da velocidade da onda [7][8].

Há 3 formas de representação dos resultados na tela do aparelho:

- A-Scan: é a forma tradicional de apresentação, com ecos de reflexão indicando a reflexão do som nas interfaces.
- B-Scan: a tela do aparelho mostra a seção transversal da peça (feita em cortes).
- C-Scan: a tela do aparelho mostra a vista superior da peça à direção do feixe sônico.

2.4.3 Surlyn 8940 Dupont®

O Surlyn 8940, fornecido pela Dupont®, é um copolímero iônico termoplástico de etileno-ácido metacrílico com potencial auto regenerativo. Esses materiais serão utilizados como adesivo entre placas de compósitos de fibra de carbono como simulação de juntas de aeronaves, pois representam uma região com alta concentração de tensões, elevando o potencial de falhas nessas estruturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Calibração e Equipamentos para Análise por Ultrassom

A técnica de inspeção por ultrassom necessita de uma calibração para padronizar as escalas em relação aos padrões de referência das amostras sem defeitos e danos introduzidos. Para isso, é necessário um acoplante para retirada da camada de ar presente entre o transdutor e a peça que, para nossos ensaios foi utilizado um gel

específico para ultrassom. Para a calibração de peças metálicas utilizamos o bloco padrão V1 mostrado na Figura 5.

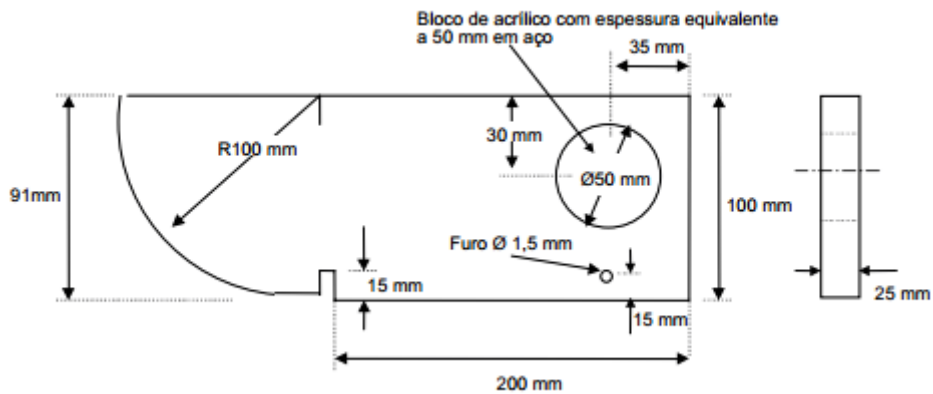


Figura 5 - Medidas do bloco V1 norma DIN 54120.

A calibração e inspeções para metais foram realizadas com transdutor DL4R de 4 MHz operando na modalidade duplo-cristal.

Para a calibração de compósitos utilizamos um bloco padrão confeccionado pela Alltec® mostrados na Figura 6, com suas respectivas dimensões representadas na Figura 7.



Figura 6 - Bloco padrão para calibração em compósito.

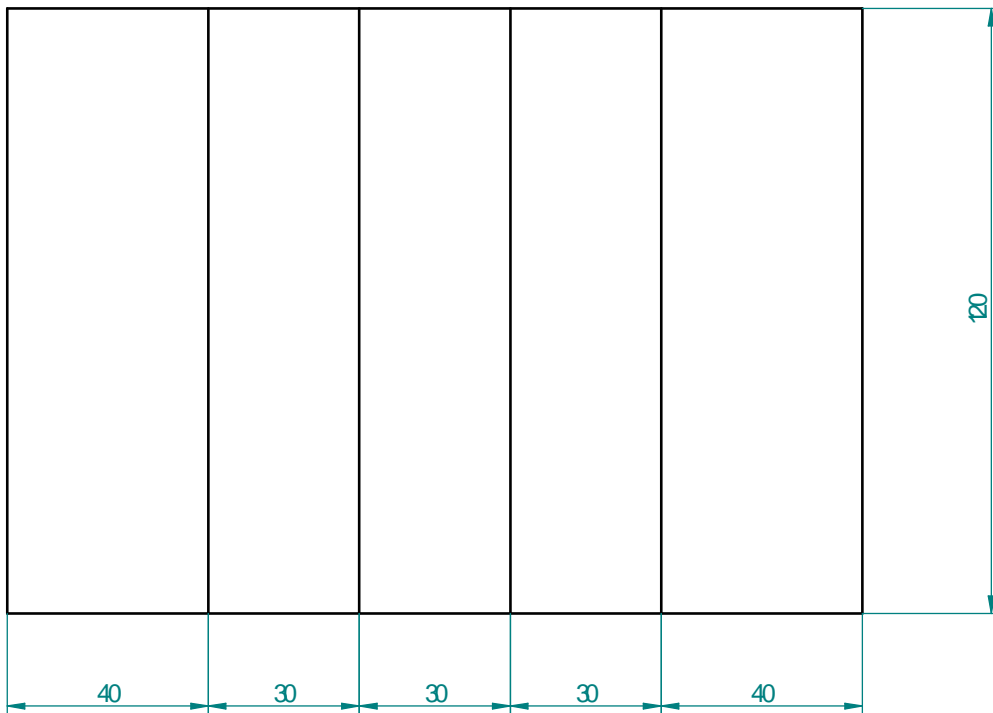


Figura 7 - Dimensões reais do bloco padrão de compósito.

A calibração dos laminados de GLARE foi adaptada, pois não possuíamos blocos padrão de calibração para esse tipo de laminado híbrido. Dessa forma, utilizamos um corpo de prova verde de alumínio para a calibração desse material, mostrado na Figura 8.

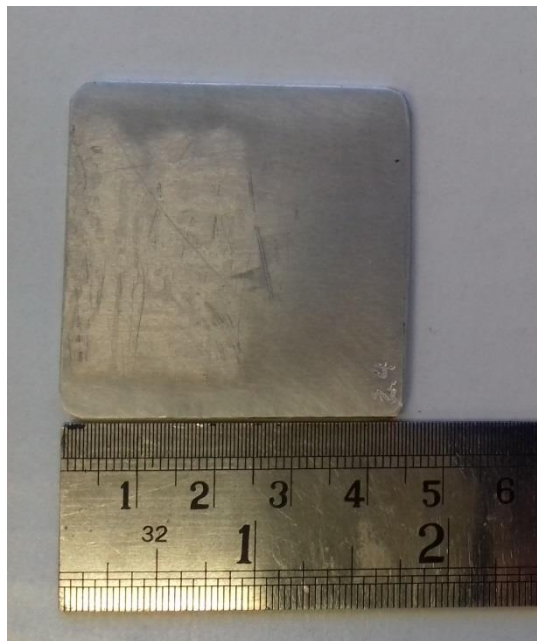


Figura 8 – Bloco de alumínio para calibração de GLARE.

A calibração e inspeções para compósitos e GLARE foram realizadas com transdutor V202 de 10 MHz operando na modalidade pulso-eco.

A Figura 9 abaixo mostra todos os componentes utilizados para realizar as técnicas de inspeção por ultrassom.

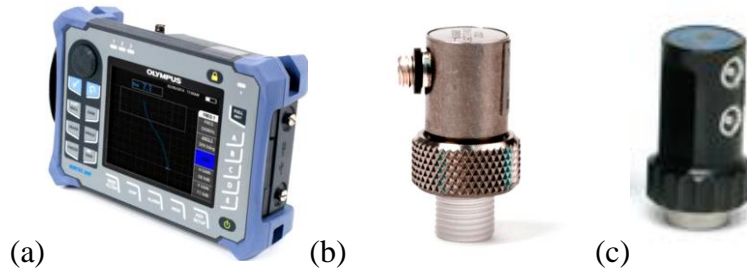


Figura 9 - (a) Equipamento de Ultrassom Olympus® Epoch 600. (b) Transdutor V202 de 10MHz. (c) Transdutor DL4R de 4MHz.

3.2 Confeção dos Laminados Compósitos e Lâminas de Surlyn

Placas de compósitos foram confeccionadas pelo processo de infusão de resina líquida. Os dados do processo estão mostrados abaixo:

Dimensões da Placa: 40 x 40 cm, possuindo 14 camadas
Orientação das Fibras: 90, 45+, 45-, 90 45+, 45-, 90, 90, 45+, 45-, 90 45+, 45-, 90
Secagem das Fibras: Temperatura de 100°C por 22 horas dentro de estufa
Resina: Araldite; 409,71 g
Proporção de Resina: 100:38
Catalisador: Aradur; 155,689 g
Infusão: 21 horas com resina + 1 hora e 15 minutos após desligamento da bomba de vácuo

Após as infusões, as placas foram cortadas nos tamanhos específicos: laminados de 100 x 50 mm e 50 x 50 mm.

Os filmes de Surlyn foram confeccionados em configurações geométricas retangulares à temperatura de 160°C com peso de 20 g e pressão de 2,5 toneladas durante 1 minuto. Resfriamento foi realizado sem pressão.

A junção dos componentes foi realizada à temperatura de 140°C por 1 hora no forno, seguindo de resfriamento por ar comprimido e, por fim, por 10 minutos em freezer (aproximadamente 90°C). O modelo final do corpo de prova está esquematizado na Figura 10 (as linhas vermelhas na figura representam as lâminas de Surlyn).

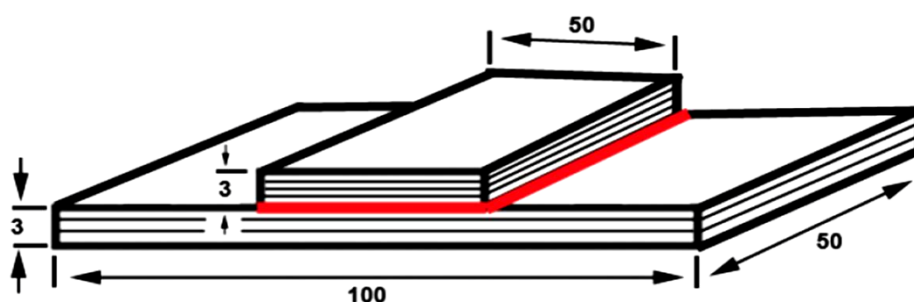


Figura 10 - Estrutura final dos corpos de prova.

3.3 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão dinâmicos foram realizados nos laboratórios do SMM-II. O equipamento utilizado foi a máquina de ensaio universal EMICTM, modelo DL 10000 (Figura 11), com célula de carga com capacidade de 1000N, interligada ao software Test, versão 1.13, o qual tem a função de registrar os valores de força e deslocamento.



Figura 11 - EMC™ modelo DL 10000.

O tempo de ensaio foi de, aproximadamente, 1.5 minutos com velocidade de ensaio, por deslocamento, de 1 mm/min. A Figura 12 faz uma representação do ensaio.

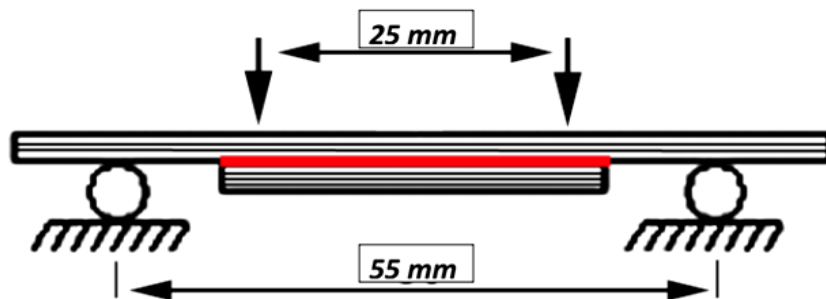


Figura 12 - Ensaio de flexão pura.

As análises com ultrassom nesses materiais serão feitas antes e após os ensaios de flexão. Além disso, após os ensaios de flexão, esses materiais serão tratados para estimular o potencial auto regenerativo do polímero, e assim, verificar se a ocorrência de trinca antes verificada, ainda permanece presente no interior dos corpos de prova, ou se houve alteração nesse comportamento pós-tratamento.

Os ensaios de flexão e o tratamento pós-ensaio para estimular o potencial auto regenerativo do Surlyn foram realizados por outros projetos de pesquisa.

3.4 Glare-5

Foram utilizados laminados de GLARE-5 2/1, fabricados pela empresa *Comtek Advances Structures* do Canadá, fornecidos pela *Aviation Equipments*, dos EUA.

A estrutura desses laminados constitui de laminas externas de alumínio 2024-T3 de 0,5 mm de espessura, fabricadas pela *Transtar Metals* e fornecidos pela LATAM Airlines Brasil, compostas interiormente de mantas unidirecionais (0°/90°) de fibras de vidro em resina epóxi, com espessura final de 1,6 mm.

Os ensaios de impactos balísticos foram realizados por outros projetos de pesquisa. O foco deste projeto está em verificar a viabilidade da técnica de ultrassom para ensaios nesses tipos de materiais.

O intuito destas análises é verificar até qual camada irá se verificar os danos e defeitos introduzidos pelos impactos balísticos, com o propósito de que as fibras devem impedir que os defeitos se propagassem por todo o material.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração em Compósito

A Figura 13 mostra o ecrã do Epoch 600 durante a etapa de calibração na espessura do bloco, confrontando a espessura de 1 mm estabelecida em projeto e a medida proveniente do ensaio.

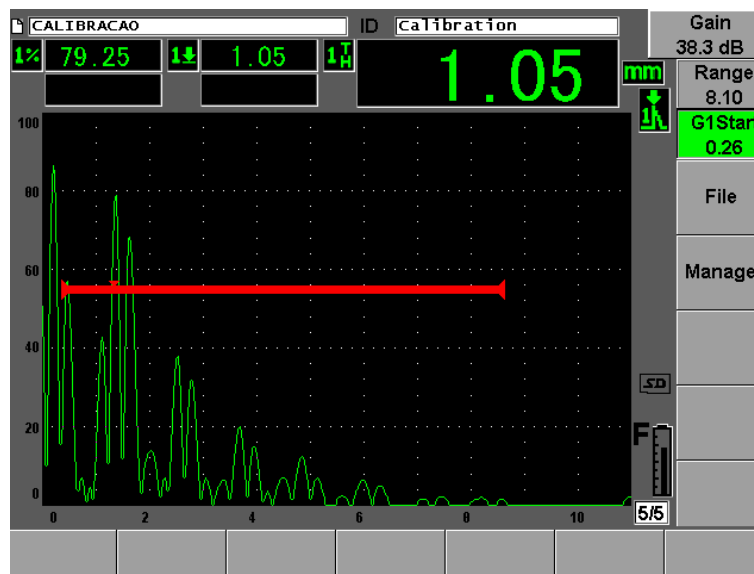


Figura 13 - Calibração em 1 mm de espessura.

O resultado da espessura visualizada no ecrã do aparelho pode ser verificada no canto superior direito da Figura 13, representando o valor de 1.05 mm, que está dentro dos limites do projeto para o erro do equipamento. Os ecos menores seguintes representam os ecos de repetição do eco de fundo, havendo um decaimento de energia do feixe, sendo representado pela diminuição das amplitudes dos ecos, indicando um limite inferior de trabalho do transdutor que, neste material, é de 1 mm de espessura.

A Figura 14 mostra a medida de calibração proveniente da maior espessura do bloco (8 mm).

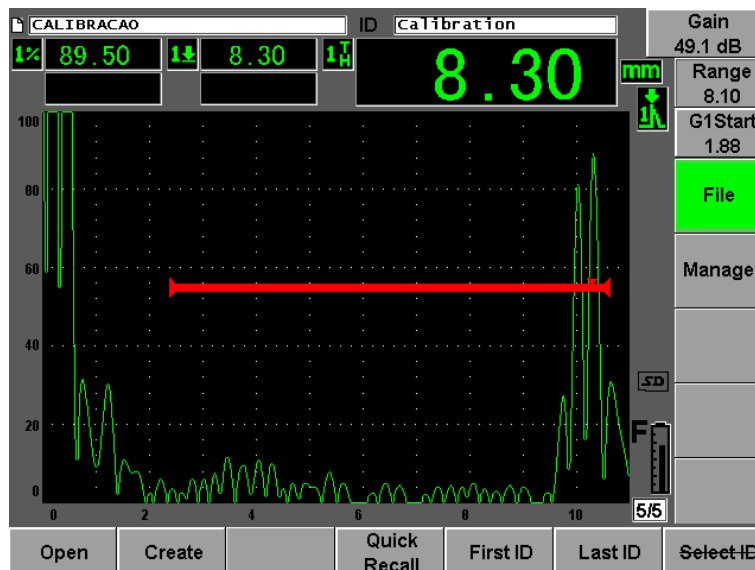


Figura 14 - Calibração em 8 mm de espessura.

Podemos observar, da mesma forma, o resultado agora obtido sendo de 8.30 mm de espessura.

Após a calibração, o aparelho está pronto para uso. Foram realizados ensaios em três corpos de prova diferentes, fabricados por outros projetos de Iniciação Científica.

4.2 Resultados de Ultrassom em Compósitos

4.2.1 Compósito sem Adesão

A placa compósita mostrada na Figura 15 possui espessura de 2.80 mm e, o resultado de seu ensaio está representado na Figura 16.



Figura 15 - Placa Compósita de 2.80 mm.

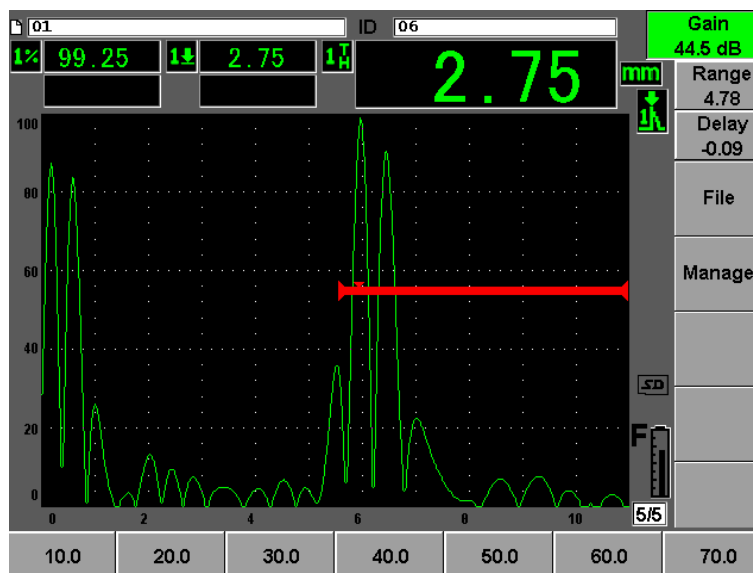


Figura 16 - Ensaio por ultrassom em compósito.

Podemos ver a nítida representação do eco de fundo da placa compósita, mostrando valor aceitável de espessura: 2.75 mm, mostrando a viabilidade do ultrassom para as placas compósitas de fibra de carbono fabricadas. Pode-se verificar que não foi observado ecos de repetição no ecrã do equipamento, mostrando a grande perda de energia do feixe sônico no interior desse material, proveniente de quantidade de bolhas que foram verificadas nos corpos de prova devido à manufatura ser realizada por projetos de iniciação científica de alunos de graduação, sendo compreensível esses problemas.

4.2.2 Compósito com Adesão

O segundo ensaio foi realizado na superfície superior de uma placa compósita com a presença do adesivo (Surlyn) sem defeitos (Figura 17), para a verificação dos ecos de reflexão do Surlyn e de fundo da superfície posterior.

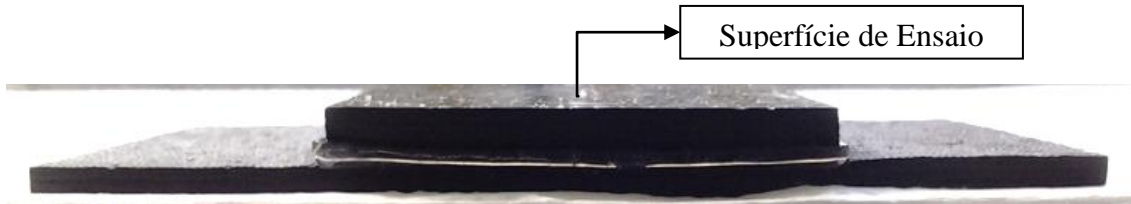


Figura 17 – Estrutura do compor de prova compósito/Surlyn ensaiada.

O resultado do ensaio realizado está mostrado na Figura 18.

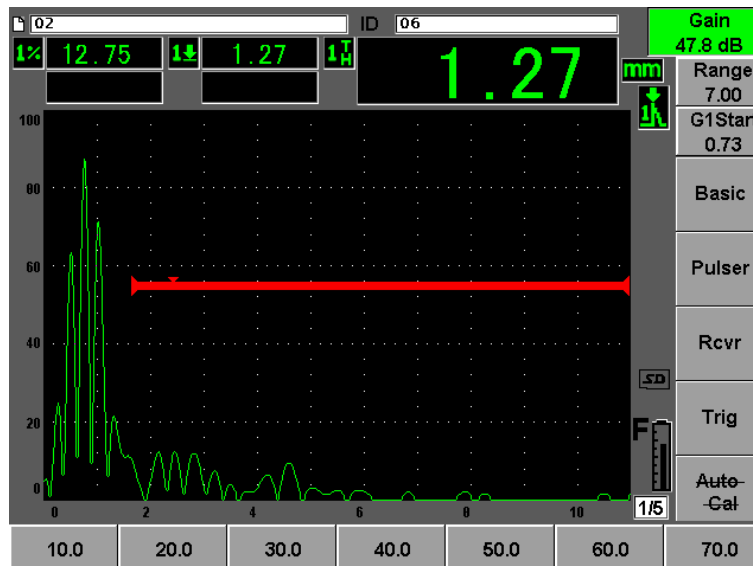


Figura 18 – Ensaio realizado no corpo de prova compósito/Surlyn.

Podemos observar que os ecos provenientes das superfícies do Surlyn e de fundo não são encontrados. Além da perda de energia que já ocorre devido à manufatura realizada, está ocorrendo grande dissipação de energia no encontro do Surlyn com o compósito.

4.2.3 Compósito Aderido Submetido a Ensaio de Flexão

O último ensaio foi realizado no corpo de prova com a presença do adesivo, após ser submetido a ensaios de flexão, resultando na presença de trincas na superfície posterior do mesmo. Os ensaios foram realizados nos pontos 1 e 2 da Figura 19.

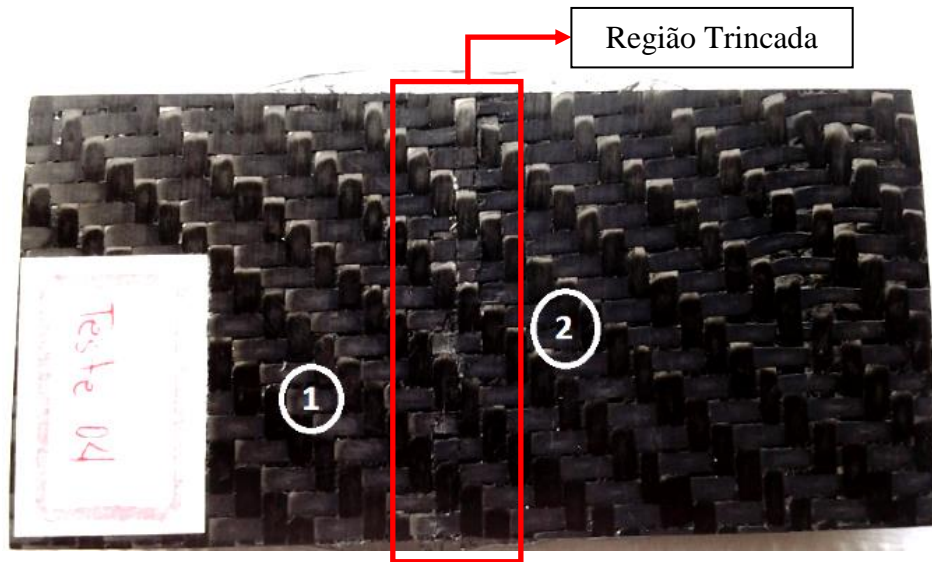


Figura 19 - Superfície Posterior da Placa Compósita Trincada.

O resultado do ensaio realizado no ponto 1 está mostrado na Figura 20.

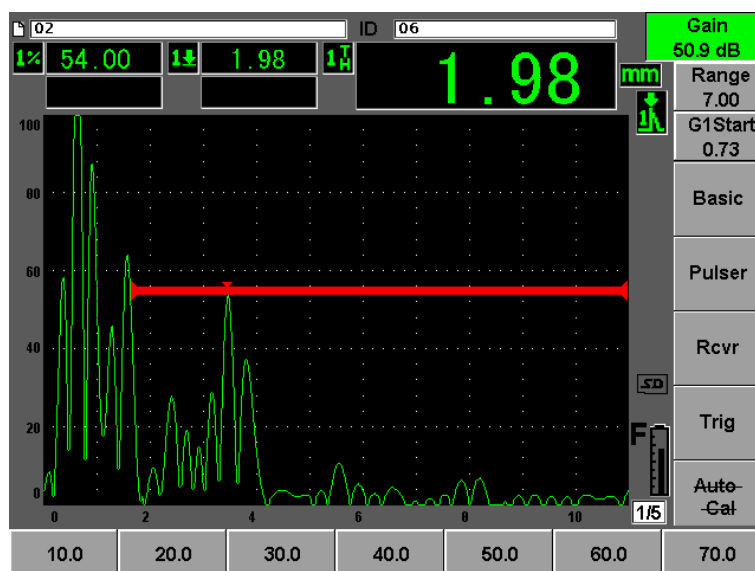


Figura 20 - Ensaio realizado no ponto 1.

O resultado do ensaio realizado no ponto 2 está mostrado na Figura 21.



Figura 21 - Ensaio realizado no ponto 2.

Foi observado que defeitos foram introduzidos no interior do corpo de prova por consequência do ensaio de flexão realizado.

Os defeitos foram encontrados no interior da primeira placa de compósito, não registrando a propagação de defeitos nas lâminas de Surllyn.

Foram realizados ensaios na superfície superior da mesma placa, nos pontos 3 e 4 da Figura 22.

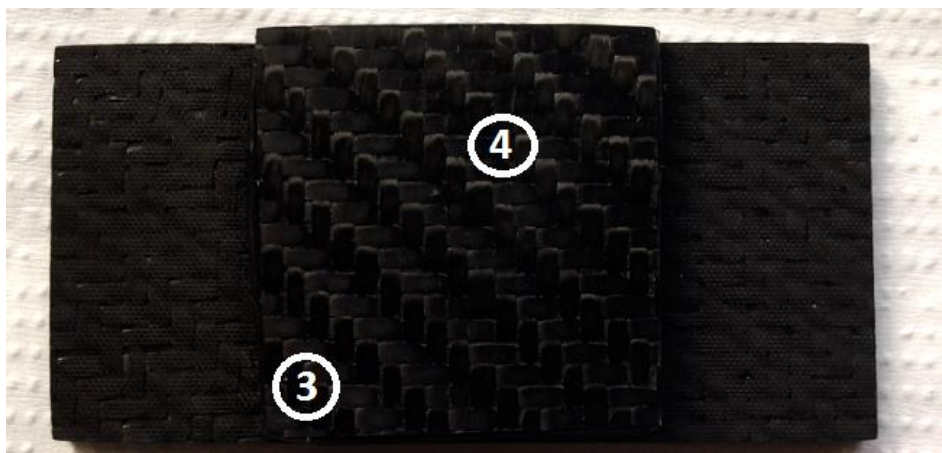


Figura 22 - Superfície Superior da Placa Compósita Trincada.

O resultado obtido pelo ensaio no ponto 3 está mostrado na Figura 23.

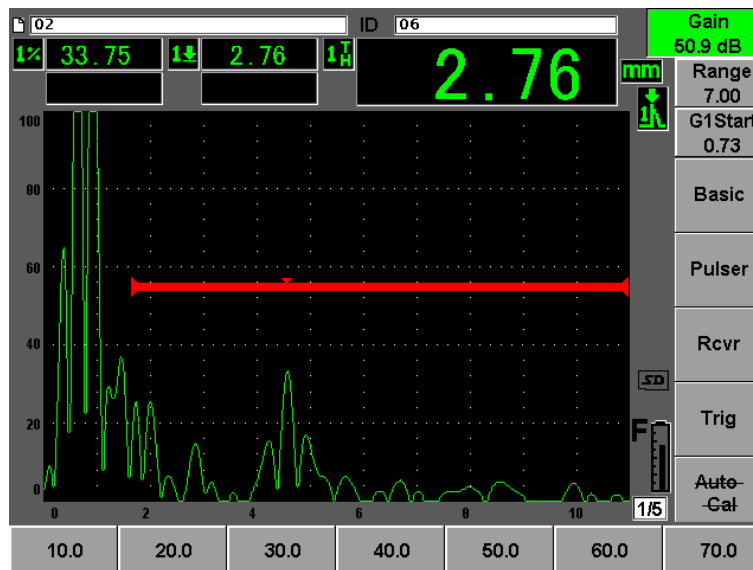


Figura 23 - Ensaio realizado no ponto 3.

O resultado obtido pelo ensaio no ponto 4 está mostrado na Figura 24.

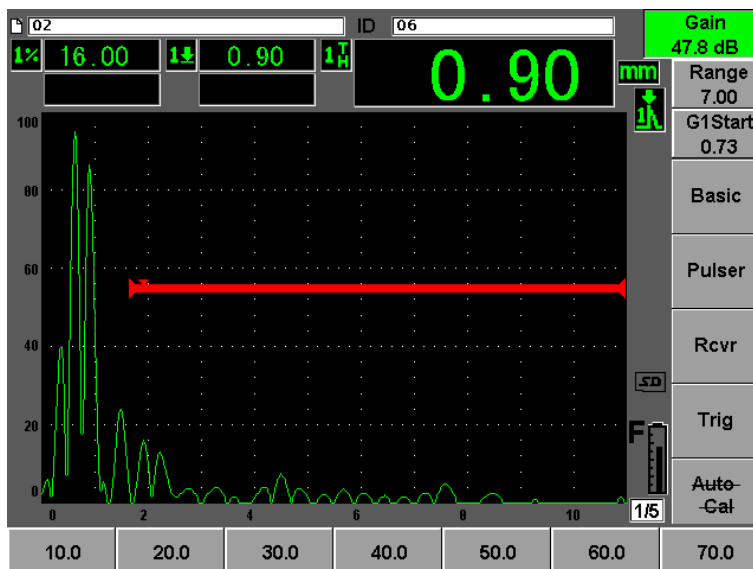


Figura 24 - Ensaio realizado no ponto 4.

Analisando a Figura 23, podemos verificar que o valor obtido pelo ensaio, 2.76 mm, representa a espessura da placa superior à superfície de colagem. Esse resultado é válido, pois nesse ponto, houve uma separação entre o Surllyn e o compósito, não danificando o mesmo. O resultado obtido pelo ensaio mostrado na Figura 24 não mostra ecos de reflexão e de fundo, mostrando a grande dissipação de energia já verifica nos ensaios anteriores.

Pode-se fazer uma análise importante neste ponto pois, apesar da dissipação de energia e das bolhas encontradas no material, quando a placa de compósito não está

aderida ao Surlyn, o ecrã do ultrassom registra o eco de fundo de 2,75 mm referente à placa, ou seja, caso encontrado ecos de 2,75 mm nos ensaios, podemos afirmar que houve deslocamento neste ponto entre o Surlyn e o compósito.

4.3 Calibração em GLARE

Como mencionado, a calibração nesses materiais foi adaptada para os recursos que tínhamos disponíveis. Dessa forma, calibramos o equipamento em corpo de prova de alumínio (Figura 8) de, aproximadamente, 1.55 mm de espessura. Como precisamos de duas espessuras para calibrar o equipamento, realizamos esse processo da seguinte forma:

1. Calibração do eco de fundo de 1.55 mm de espessura.
2. Calibração do primeiro eco de repetição de 3.10 mm de espessura.

Os resultados das espessuras calibradas estão mostrados nas Figuras 25 e 26 (espessura de 1.5 mm) e Figuras 27 e 28 (espessura de 3.10 mm).

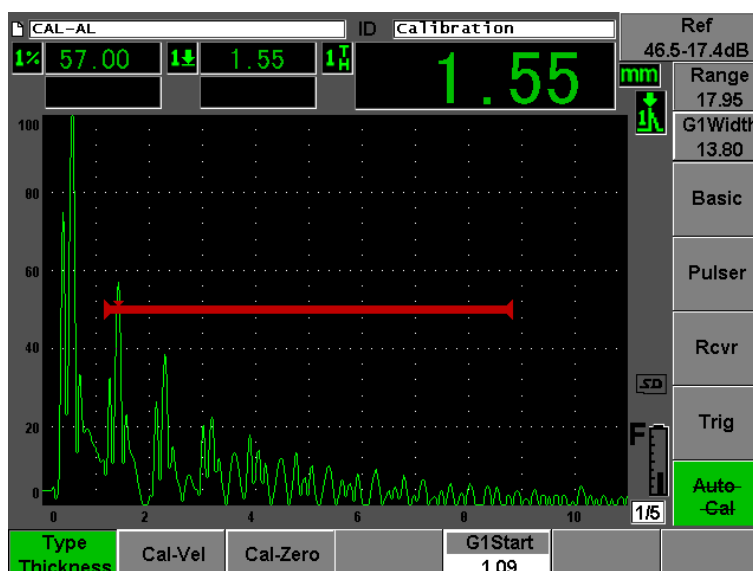


Figura 25 - Identificação do eco de fundo de 1.55 mm.

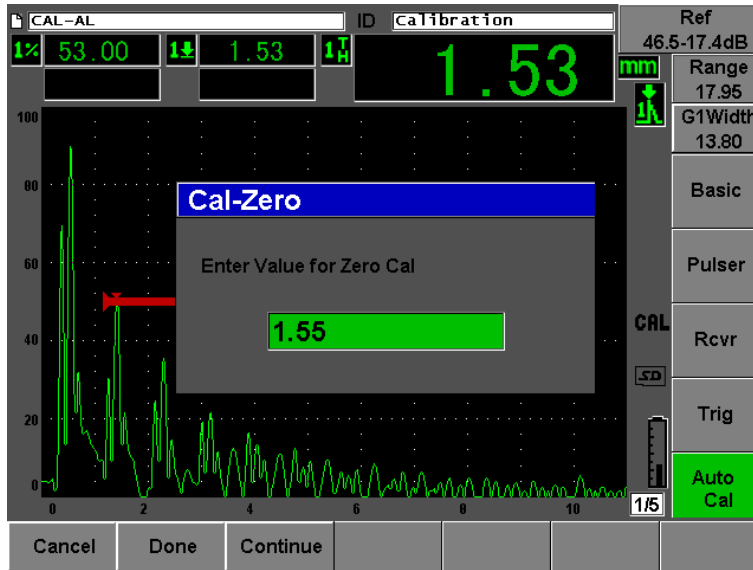


Figura 26 - Calibração da espessura de 1.55 mm.

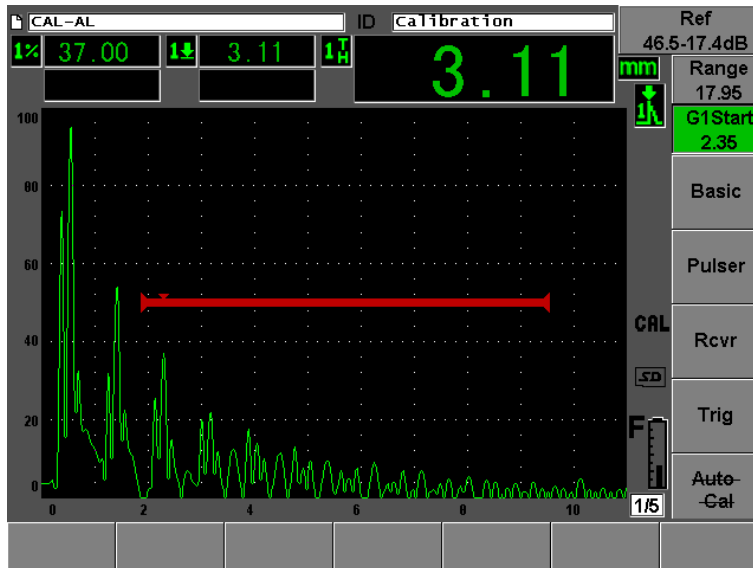


Figura 27 - Identificação do eco de repetição de 3.10 mm.

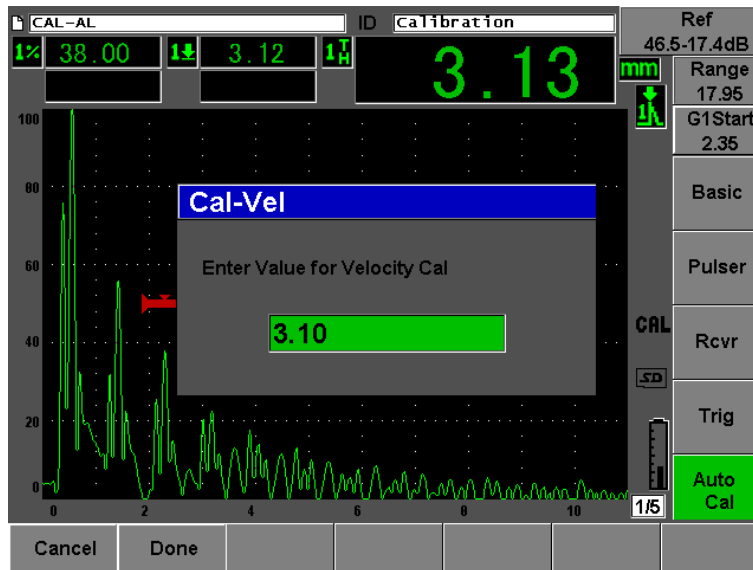


Figura 28 - Calibração da espessura de 3.10 mm.

4.4 Resultados de Ultrassom em GLARE

4.4.1 GLARE Verde

O primeiro passo antes de iniciar os testes de ultrassom em GLARE sob impactos balísticos foi verificar placas desse material sem nenhum dano sofrido. O resultado ideal seria obter três picos no ecrã do equipamento, onde o primeiro pico representaria o eco de fundo do alumínio, o segundo pico, sendo o eco de fundo do compósito e, o último, a espessura final do material. O corpo de prova ensaiado está mostrado na Figura 29, e o resultado do ensaio em ultrassom na Figura 30.

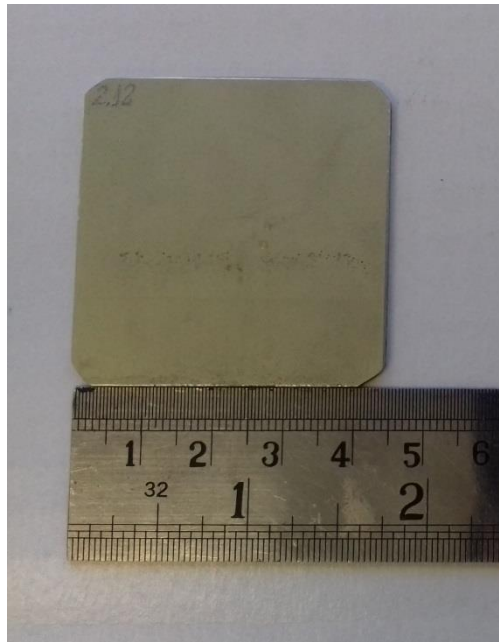


Figura 29 - Placa de GLARE verde.

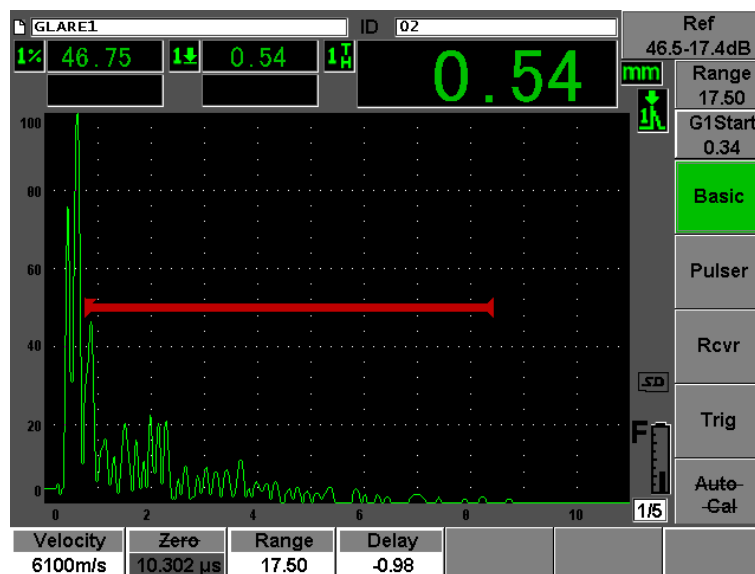


Figura 30 - Ensaio de Ultrassom em GLARE verde.

Analisando a Figura 30, podemos verificar, logo após o eco de entrada do transdutor, um primeiro eco, de 0.54 mm de espessura, onde podemos afirmar que representa o eco de fundo referente à primeira placa de alumínio do GLARE. Houve a tentativa de aumentar as distâncias entre os picos, a fim de melhorar a leitura dos mesmos, mas houve grandes distorções nos resultados com essa alteração, deixando o ecrã padronizado nesse formato.

Além do eco de fundo do alumínio, o resultado está nos mostrando diversos outros ecos no qual não fica claro sua identificação e relação com as camadas interiores do GLARE. Após diversas análises em GLARE verde, chegamos às conclusões dos supostos ecos de fundo da fibra de vidro (Figura 31) e eco de fundo do material (Figura 32).

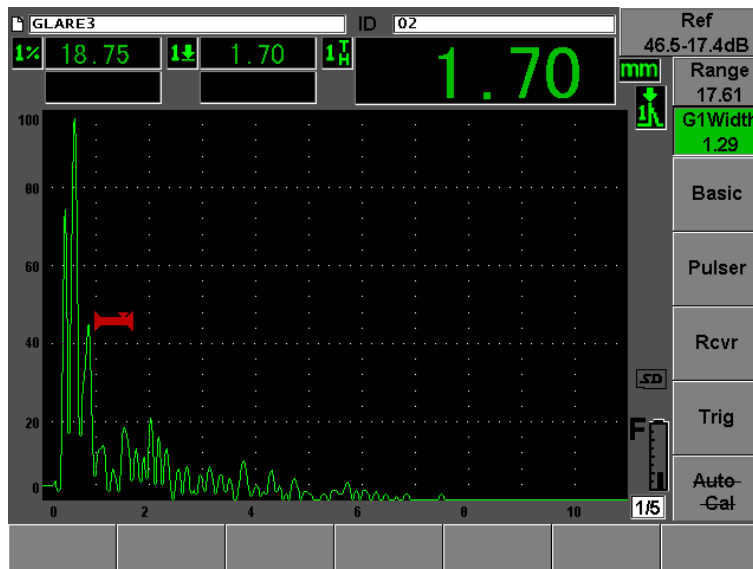


Figura 31 - Eco referente à fibra de vidro.

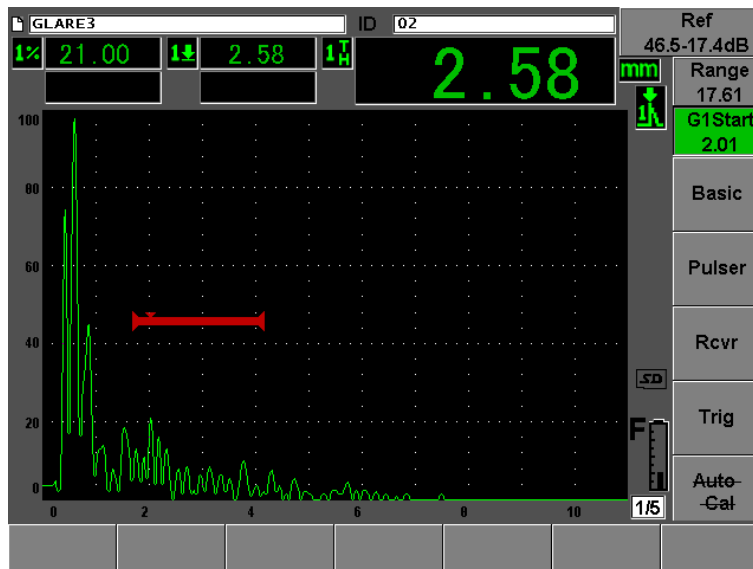


Figura 32 - Eco de fundo do GLARE.

Podemos verificar o valor de espessura representado no ecrã do equipamento referente aos ecos de fundo da fibra de vidro e do material, respectivamente, 1.70 mm e

2.58 mm. Os valores que deveriam ser registrados no equipamento são, aproximadamente, 1.1 mm e 1.6 mm.

Essa discrepância era prevista de acontecer, pois o equipamento foi calibrado em alumínio apenas, no qual possui impedância e velocidade do som no material específicas ($V_{\text{som}} = 6100$ m/s) e diferentes da fibra de vidro ($V_{\text{som}} = 3620$ m/s).

Dessa forma, quando o feixe sônico, calibrado com velocidade do som de 6100 m/s atravessa a camada de alumínio e passa para a fibra de vidro, ele muda sua velocidade para 3620 m/s, mas registra outros valores de espessura, pois foi calibrado a 6100 m/s. Esse é o motivo da diferença dos valores registrados acima.

Uma relação entre as velocidades e os valores de espessura foi feito a fim de verificar os valores corretos de espessura e afirmar os respectivos ecos de fundo da fibra de vidro e do material, representado a seguir:

$$V_{\text{AL}} = 6100 \text{ m/s e } V_{\text{Fibra}} = 3626 \text{ m/s}$$
$$V_{\text{AL}} = 1.7 * V_{\text{Fibra}}$$

Portanto, a mesma relação é feita para as espessuras da fibra de vidro e do material:

$$E_{\text{fibra}} = 1.70/1.70 = 1 \text{ mm}$$
$$E_{\text{material}} = 2.58/1.70 = 1.51 \text{ mm}$$

Podemos verificar que os valores encontrados acima estão equivalentes com os valores reais do corpo de prova.

4.4.2 GLARE sob impacto balístico

Diferentemente dos compósitos com Surlyn, conseguimos identificar e verificar os ecos referentes às diferentes camadas de materiais no corpo de prova, mostrando que o feixe sônico é capaz de penetrar no material, podendo agora iniciar testes em GLARE sob impacto balístico.

O corpo de prova ensaiado está representado na Figura 33, sendo nítida a marca referente ao projétil disparado no material.



Figura 33 - GLARE sob impacto balístico.

Alguns dos corpos de prova que sofreram essa deformação não foram ideais para ensaios por ultrassom, pois a deformação causada na superfície pelo projétil desfavoreceu o acoplamento do transdutor na mesma, sendo o ensaio inválido. O corpo de prova da Figura 33 possui áreas planas suficientes para promover o ensaio. As Figuras 34 e 35 mostram dois pontos onde foi possível identificar defeitos no interior do material.



Figura 34 - Defeito encontrado a 0.8 mm da superfície do GLARE.

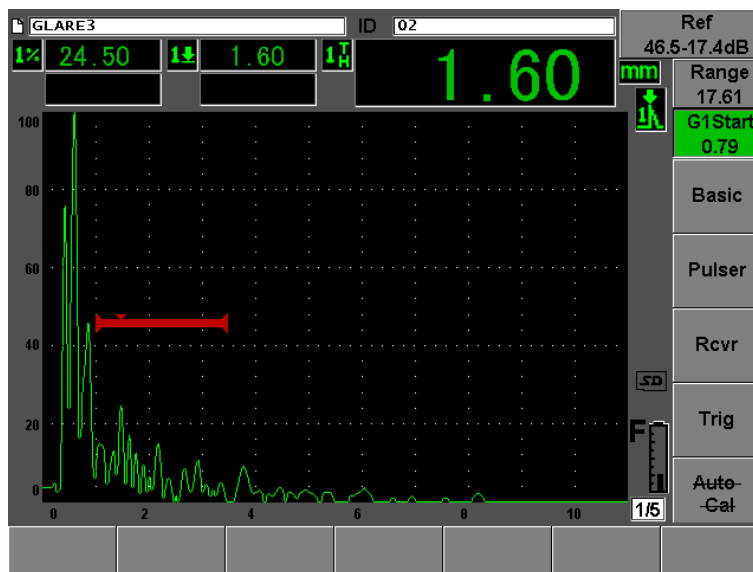


Figura 35 - Defeito encontrado a 0.95 mm da superfície do GLARE.

É nítido na Figura 34 a delaminação presente no interior do material, especificamente, na fibra de vidro, pois podemos verificar o eco de fundo referente à primeira camada de alumínio, e vemos que os ecos de fundo da fibra e do material não aparecem no ecrã do equipamento, pois o feixe sônico incide inteiramente sobre o defeito, ocorrendo reflexão total.

A Figura 35 mostra um defeito, também dentro da camada de fibra de vidro, onde ainda podemos verificar o eco de fundo do material. Pelo valor registrado no equipamento, podemos ver que o defeito encontrado está bem próximo à interface fibra de vidro/alumínio, ocorrendo sobreposição dos ecos de fundo da fibra e do defeito, motivo pelo qual não conseguimos identificar os dois ecos no ecrã do equipamento.

Um ensaio de microtomografia computadorizada nesse mesmo corpo de prova foi realizado por outro projeto de pesquisa, onde podemos verificar a grande quantidade de delaminação no interior da fibra de vidro. Os resultados dos ensaios estão mostrados nas Figuras 36.

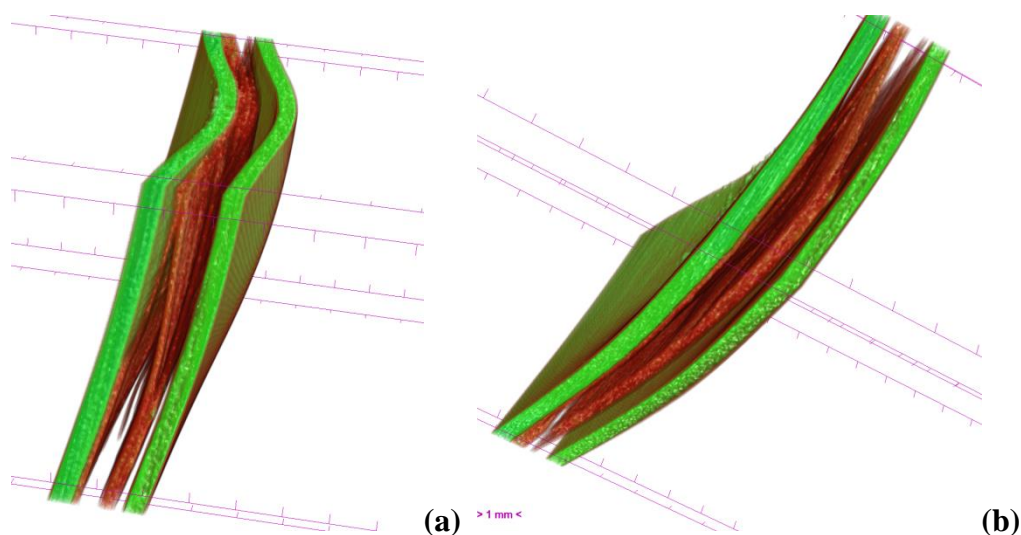


Figura 36 - (a) Análise da vista lateral. (b) Análise da seção do corpo de prova.

4.5 Ensaio de Ultrassom em Metais

Como mencionado no começo deste trabalho, os ensaios em blocos metálicos foram realizados a fim de organizar um material didático para posteriores pesquisas utilizando ultrassom como END.

Todas as medidas nos desenhos 2D estão em milímetros.

Todas as peças ensaiadas possuem espessuras de 45 mm.

4.5.1 Método de Calibração

Primeiramente devemos verificar se o aparelho está trabalhando na modalidade duplo-cristal, sendo feita seguindo os passos: **Pulser** > **Mode**, e movimentar o cursor selecionando a modalidade **Dual**.

A calibração do aparelho é feita utilizando duas espessuras diferentes. Para nossos ensaios utilizaremos as espessuras de 25 mm e 100 mm do bloco padrão V1 (Figura 5) respectivamente. Portanto, primeiramente deve-se posicionar o transdutor na superfície superior do bloco relativo à espessura de 25 mm e identificar o eco de fundo (eco de maior energia). Como temos um bloco padrão sem descontinuidades e imperfeições, o eco de fundo sempre será o primeiro eco presente no ecrã do aparelho. Para selecionar este eco, basta posicionar a porta de entrada sobre o mesmo seguindo as funções: **Gates** > **G1 Start**, e movimentar o cursor até a sobreposição da porta de entrada e do eco. A Figura 37 mostra esse mecanismo.

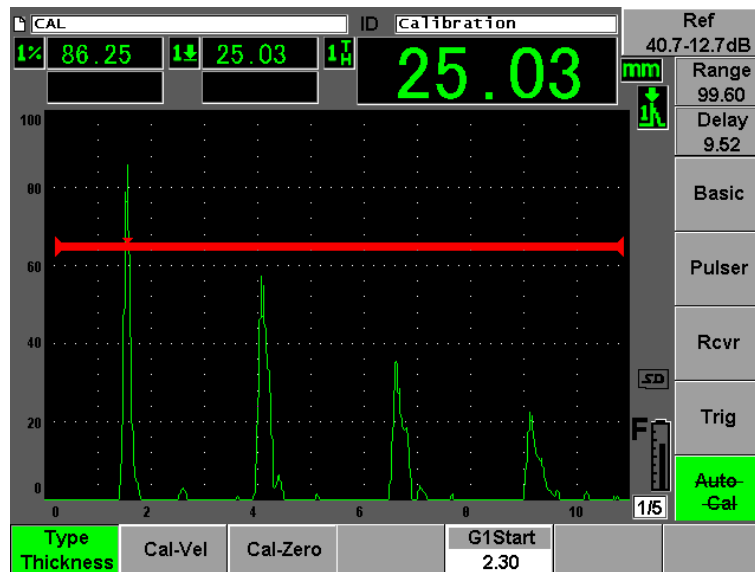


Figura 37 - Identificação do eco de fundo da menor espessura.

Podemos observar na Figura 8 que a porta de entrada está definindo o valor de 25.03 mm de espessura para esse eco, sendo o correto, 25 mm. A seguir, deve-se realizar a calibração segundo o mecanismo: **Auto Cal > Cal-Zero**. Com isso, irá aparecer uma caixa de entrada no ecrã do aparelho para ser introduzido o valor correto de 25 mm. Este mecanismo está representado na Figura 38.

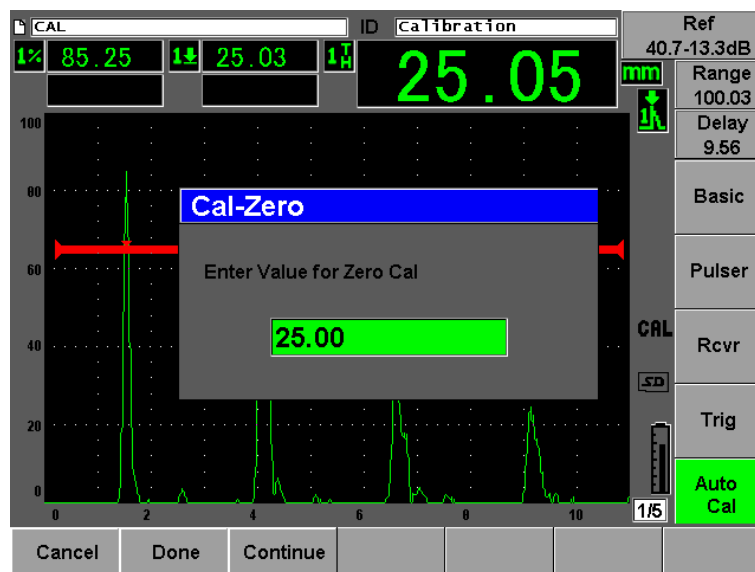


Figura 38 - Calibração da menor espessura.

Após selecionar o valor correto, selecionamos a função Continue. A primeira calibração está feita, portanto, podemos dar sequência para a calibração de 100 mm. Como realizado para a calibração de 25 mm, deve-se posicionar o transdutor na superfície superior relativa à espessura de 100 mm e posicionar a porta de entrada sobre o respectivo eco de fundo, como mostrado na Figura 39.

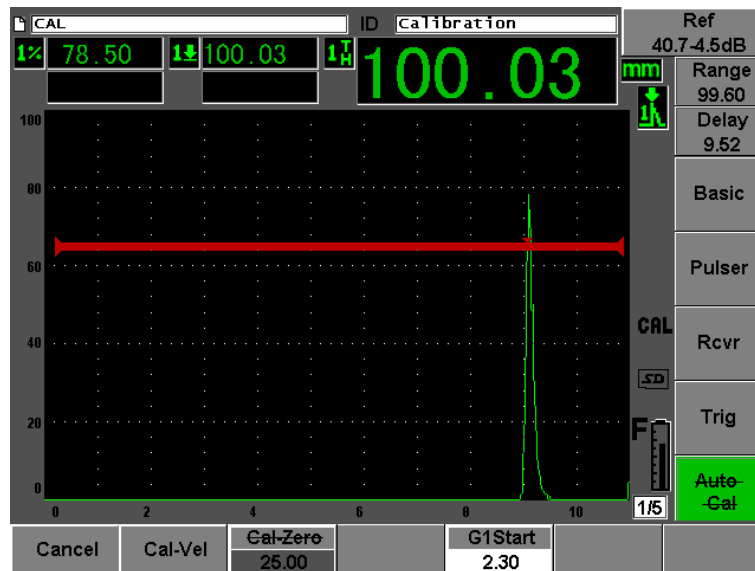


Figura 39 - Identificação do eco de fundo da maior espessura.

Para realizar a última calibração, devemos seguir o seguinte mecanismo: **Auto Cal** > **Cal-Vel**, e introduzir o valor correto de 100 mm na caixa de entrada que aparecerá no ecrã do aparelho, como mostrado na Figura 40.

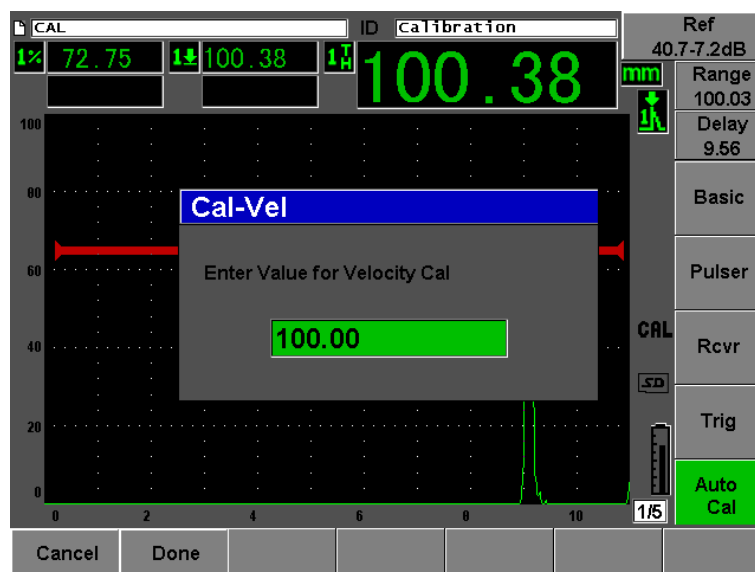


Figura 40 - Calibração da maior espessura.

Para finalizar a calibração, basta selecionar a função **Done**.

Se algum mecanismo não foi realizado corretamente, o aparelho emitirá um sinal sonoro, mostrando que a calibração deverá ser refeita. Caso contrário, podemos garantir que a calibração foi realizada corretamente e dar início aos ensaios.

4.5.2 Método Experimental

Com o aparelho calibrado, iniciamos os ensaios nos blocos metálicos. Primeiramente, realizamos o ensaio de ultrassom para verificação da espessura das peças, identificando o valor de 45 mm, mostrado na Figura 41.

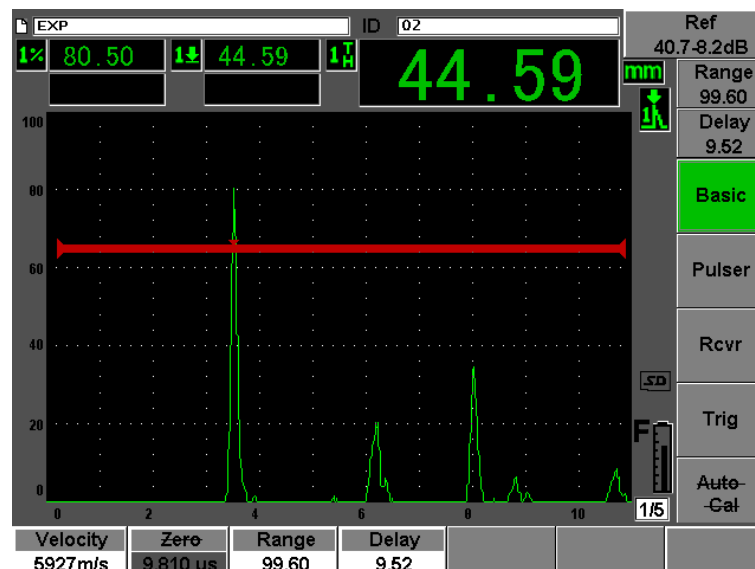


Figura 41 - Verificação da espessura dos blocos metálicos.

- **CP 1**

A Figura 42 abaixo mostra um desenho 2D realizado na CP 1, mostrando os valores medidos com auxílio de um paquímetro.

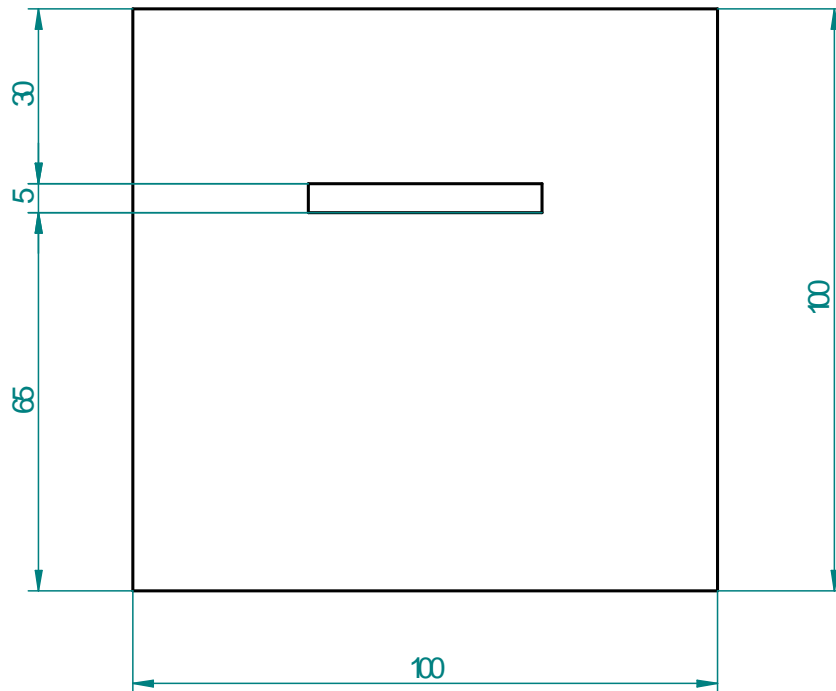


Figura 42 - Desenho 2D do CP 1.

Os ensaios foram realizados, respectivamente, nas superfícies superior e posterior da peça, com os resultados mostrados nas Figuras 43 e 44.

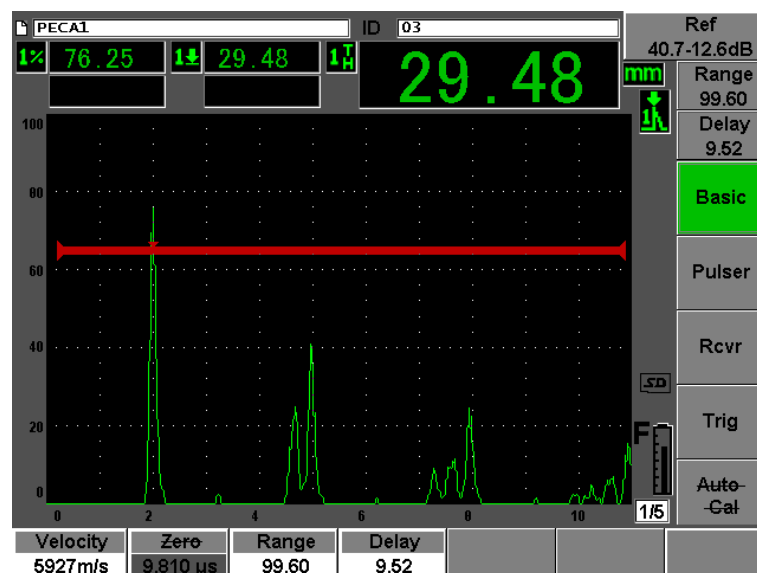


Figura 43 - Ensaio de US realizado na superfície superior do CP 1.

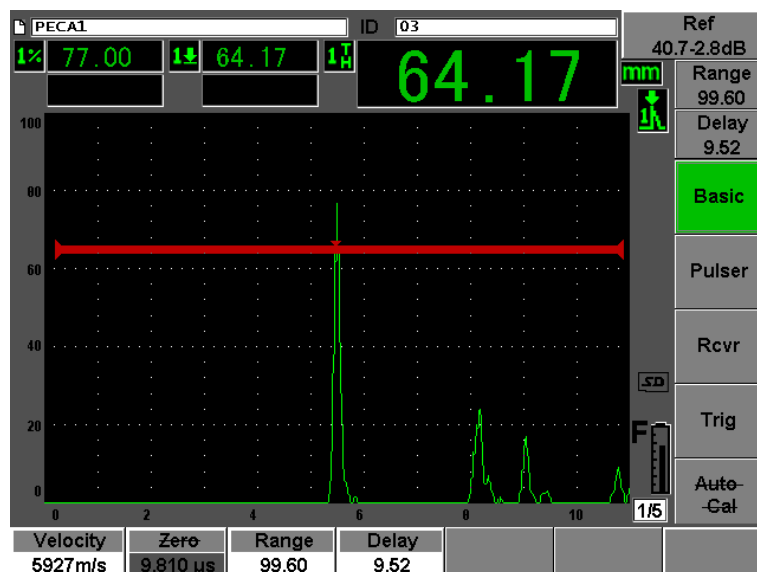


Figura 44 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 1.

- CP 2

O desenho 2D do CP2 está esquematizado na Figura 45 e, os resultados obtidos por US nas superfícies superior e posterior estão mostrados nas Figuras 46 e 47 respectivamente.

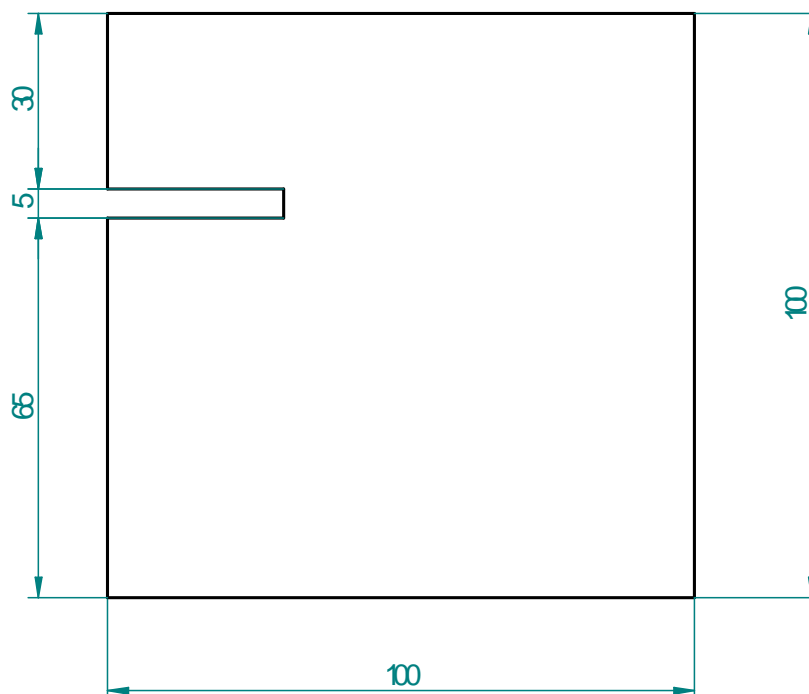


Figura 45 - Desenho 2D do CP 2.

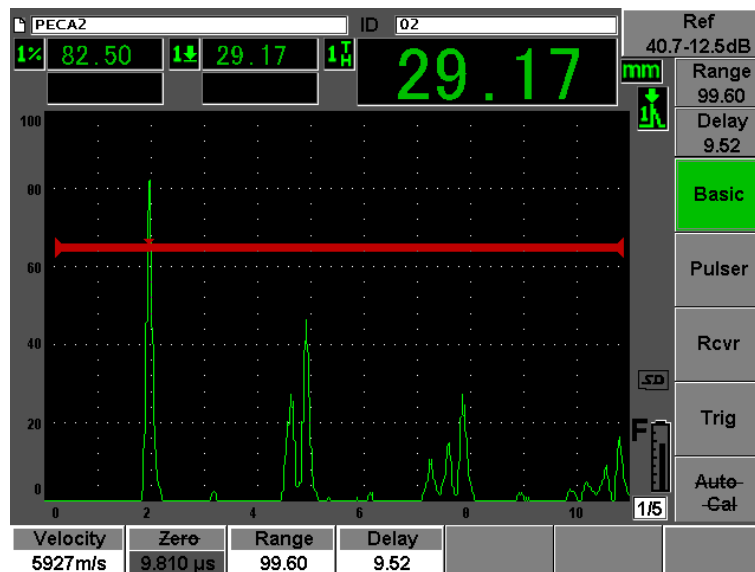


Figura 46 - Ensaio de US realizado na superfície superior do CP 2.

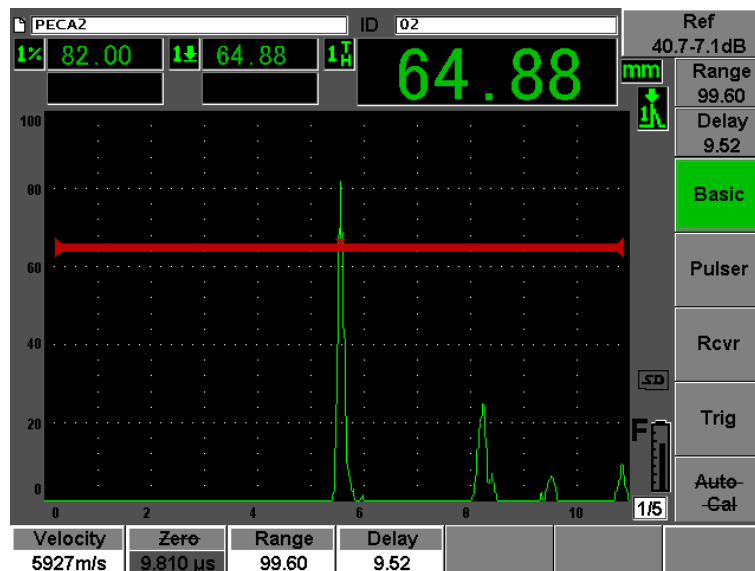


Figura 47 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 2.

- CP 3

Nesta peça realizamos 4 ensaios, sendo 2 ensaios na superfície superior e 2 ensaios na superfície inferior ,respectivamente, ambos logo acima dos vincos. Todos os pontos estão representados na Figura 48 e, os ensaios, nas Figuras 49, 50, 51 e 52.

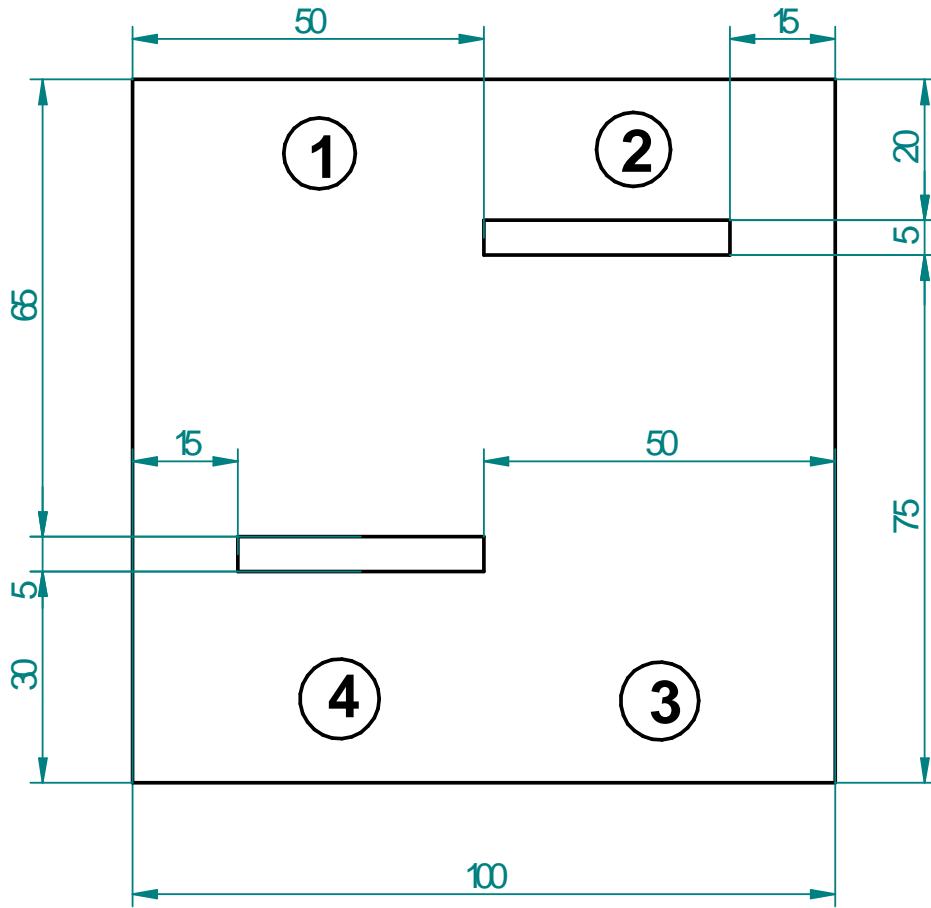


Figura 48 - Desenho 2D do CP 3.

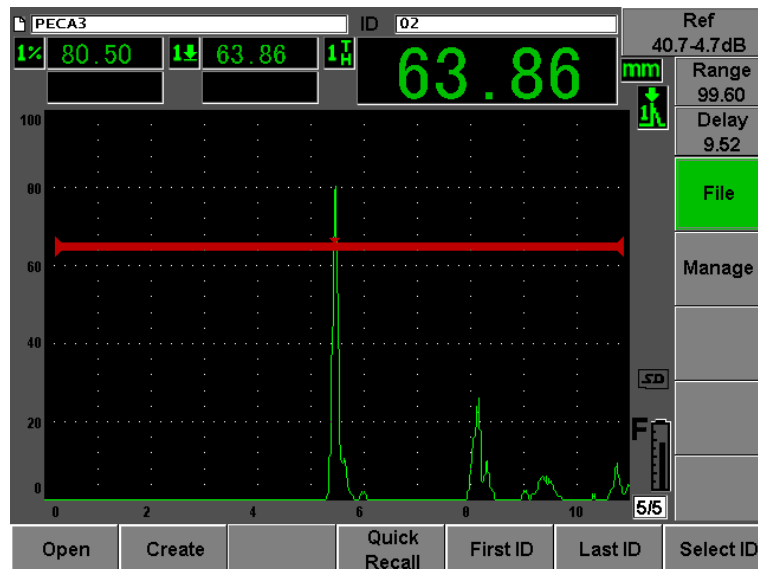


Figura 49 - Ensaio de US realizado no ponto 1 do CP 3.

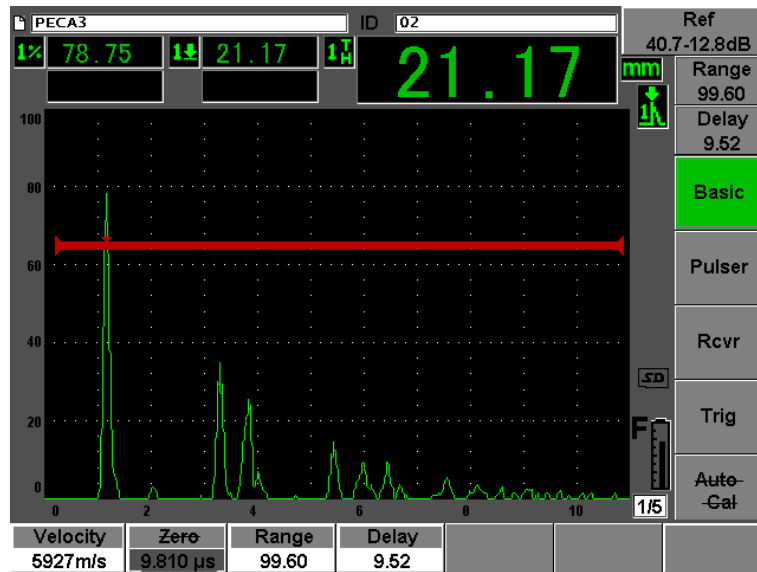


Figura 50 - Ensaio de US realizado no ponto 2 do CP 3.



Figura 51 - Ensaio de US realizado no ponto 3 do CP 3.

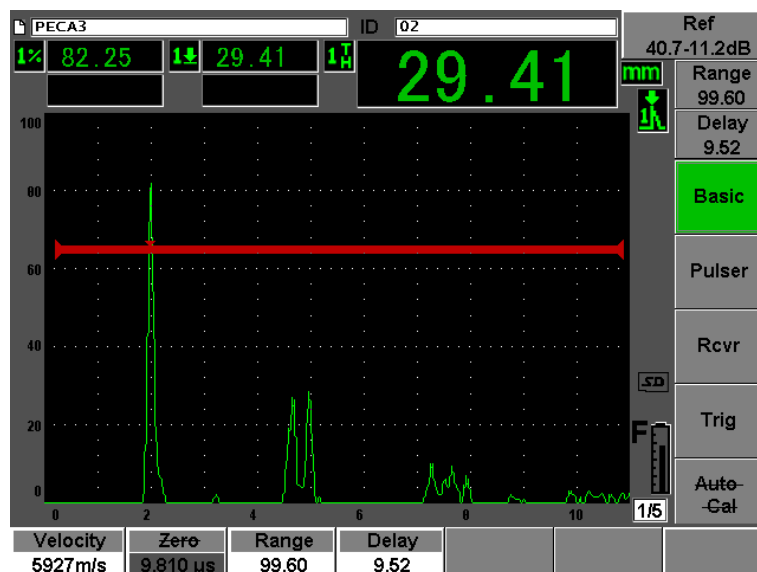


Figura 52 - Ensaio de US realizado no ponto 4 do CP 4.

- **CP 4**

O desenho 2D do CP 4 está representado na Figura 53 e, os ensaios de US realizados na superfície superior e posterior, respectivamente, estão mostrados nas Figuras 54 e 55.

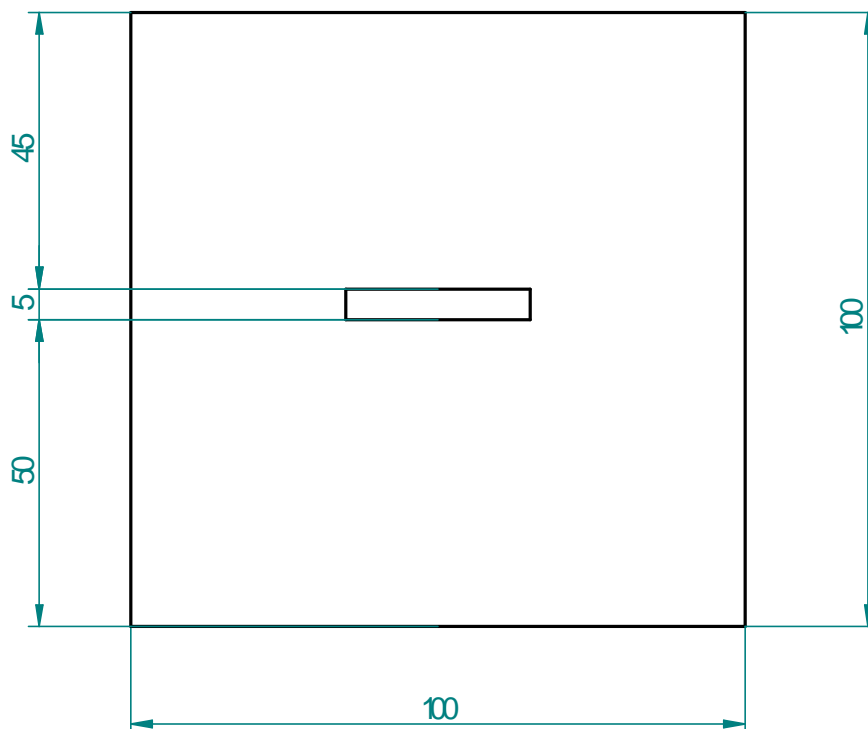


Figura 53 - Desenho 2D do CP 4.

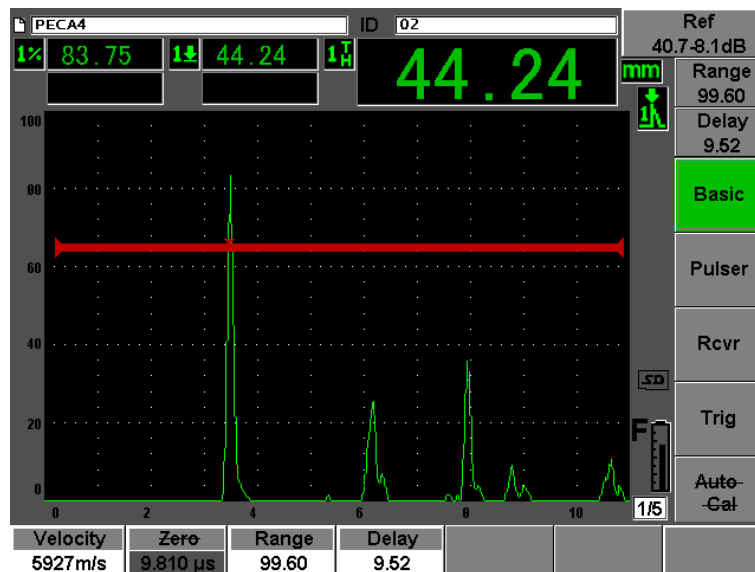


Figura 54 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 4.

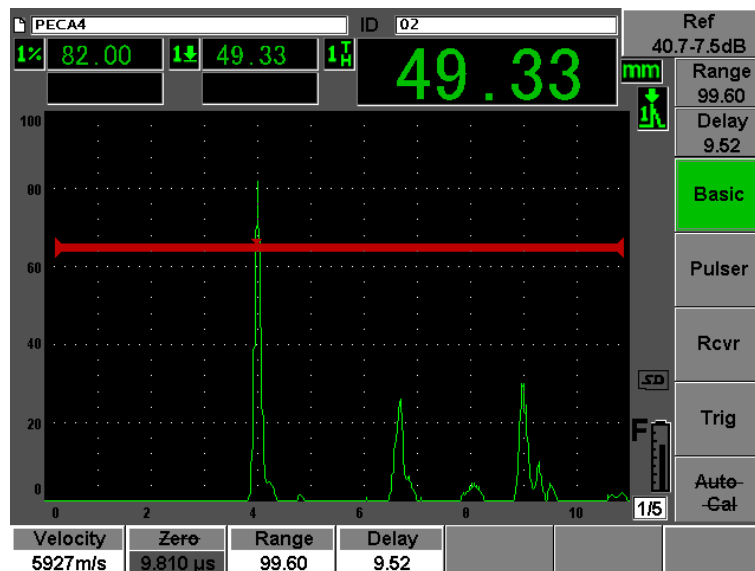


Figura 55 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 4.

• CP 5

O desenho 2D do CP 5 está representado na Figura 56 e, os ensaios de US realizados na superfície superior e posterior, respectivamente, estão mostrados nas Figuras 57 e 58.

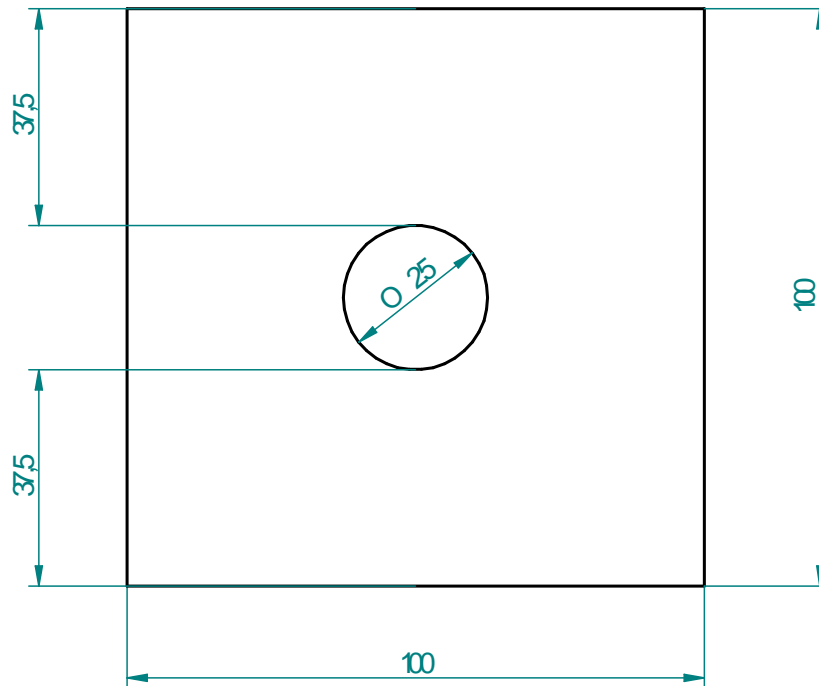


Figura 56 - Desenho 2D do CP 5.

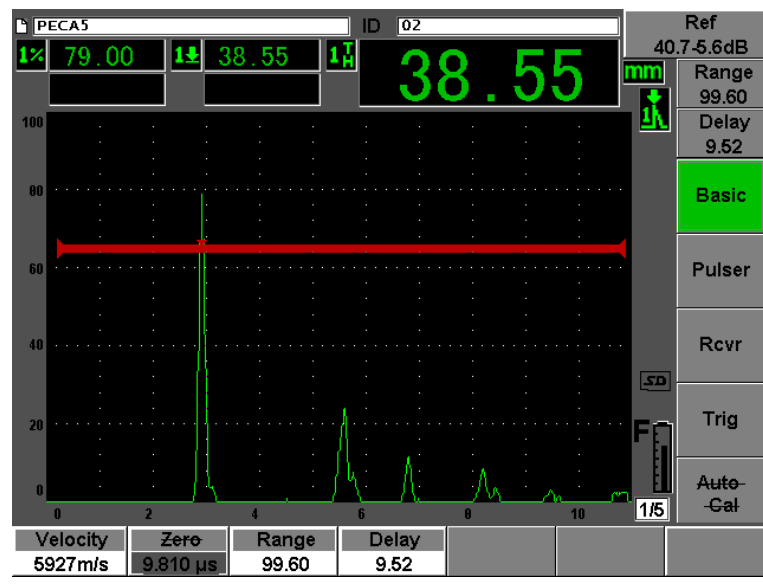


Figura 57 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 5.

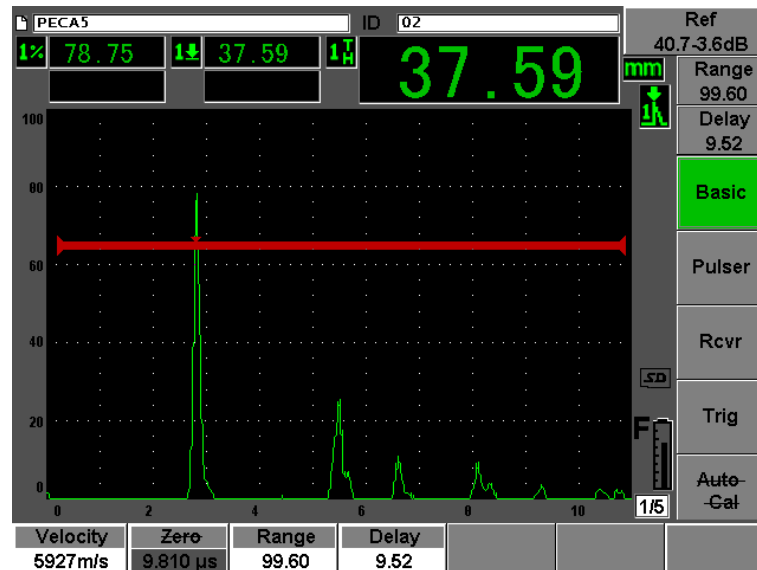


Figura 58 - Ensaio de US realizado na superfície posterior do CP 5.

4.6 Ensaio de Ultrassom em Compósitos Fibra de Carbono

4.6.1 Método de Calibração

Primeiramente devemos verificar se o aparelho está trabalhando na modalidade pulso-eco, seguindo os passos: **Pulser** > **Mode**, e movimentar o cursor selecionando a modalidade **P/E**.

A calibração do aparelho é feita utilizando espessuras diferentes, como feitos para os metais. Para nossos ensaios utilizaremos as espessuras de 1,10 mm e 8,30 mm do bloco padrão de compósito respectivamente. Portanto, primeiramente deve-se posicionar o transdutor na superfície superior do bloco relativo à espessura de 1,10 mm, identificar o eco de fundo, posicionar a porta de entrada sobre este eco e calibrar o aparelho. O mesmo deve ser realizado para a espessura de 8,30 mm. Todos os passos para essas funções são idênticos aos realizados para os metais. As Figuras 59 e 60 mostram as calibrações para as duas espessuras utilizadas.

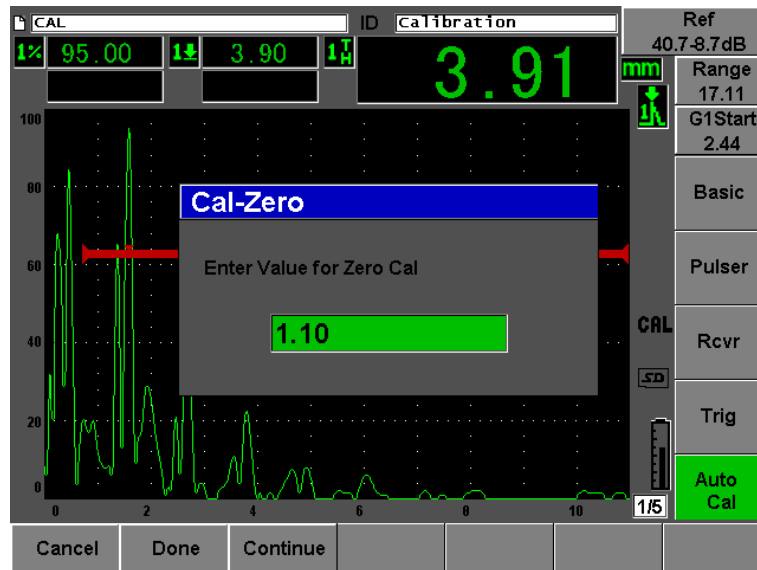


Figura 59 - Calibração da menor espessura.

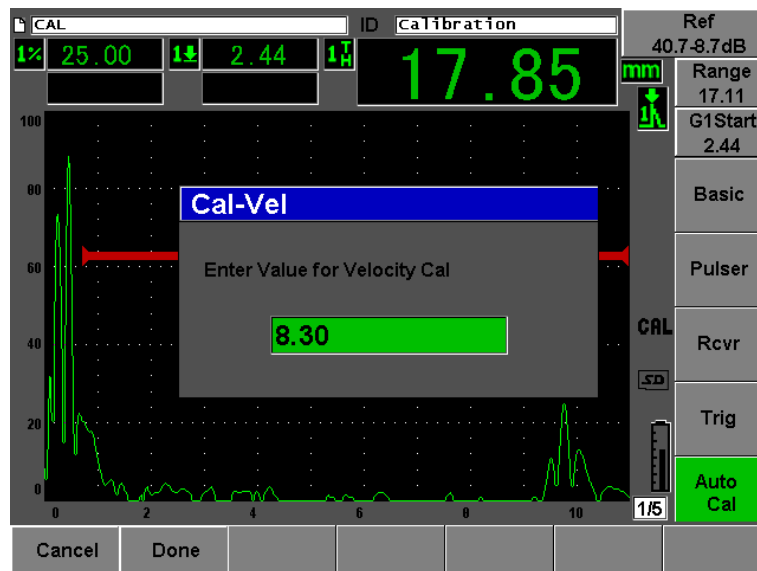


Figura 60 - Calibração da maior espessura.

4.6.2 Método Experimental

Os materiais compósitos utilizados no projeto estão mostrados na Figura 61. Uma representação em 2D dessas peças está esquematizada na Figura 62.



Figura 61 - Modelo das peças compósitas ensaiadas.

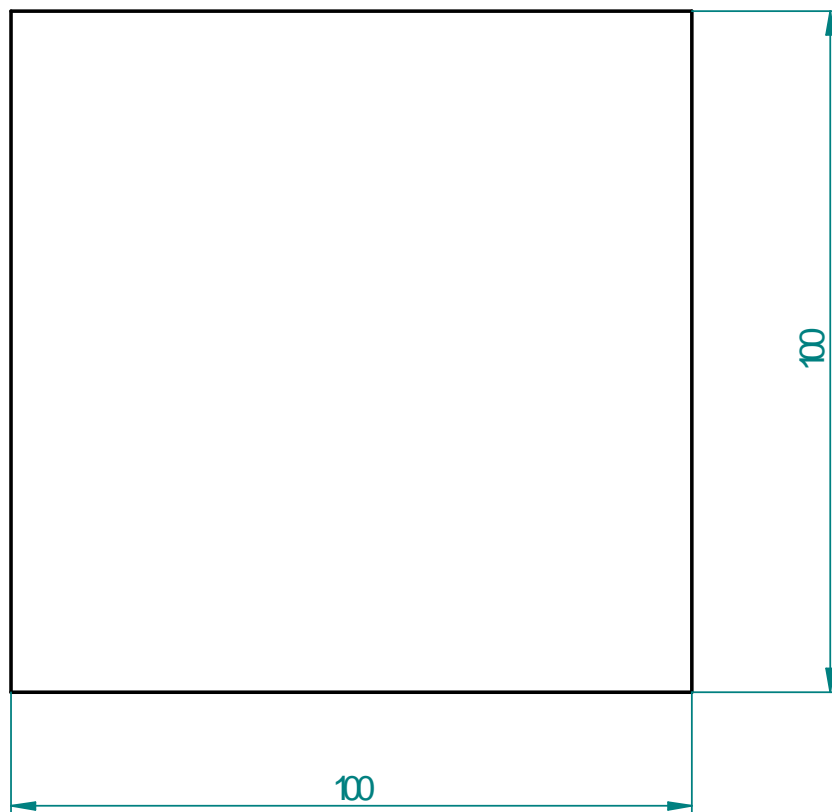


Figura 62 - Representação em 2D das peças compósitas.

Todos os materiais ensaios nesta etapa possuem 1,5 mm. Os defeitos previamente inseridos estão localizados próximos ao centro das peças.

- **CP 01**

A primeira peça possui 2 defeitos inseridos, respectivamente, a 1 mm e 0,6 mm, em relação à superfície superior da peça. Os ensaios de US estão mostrados nas Figuras 63 e 64.

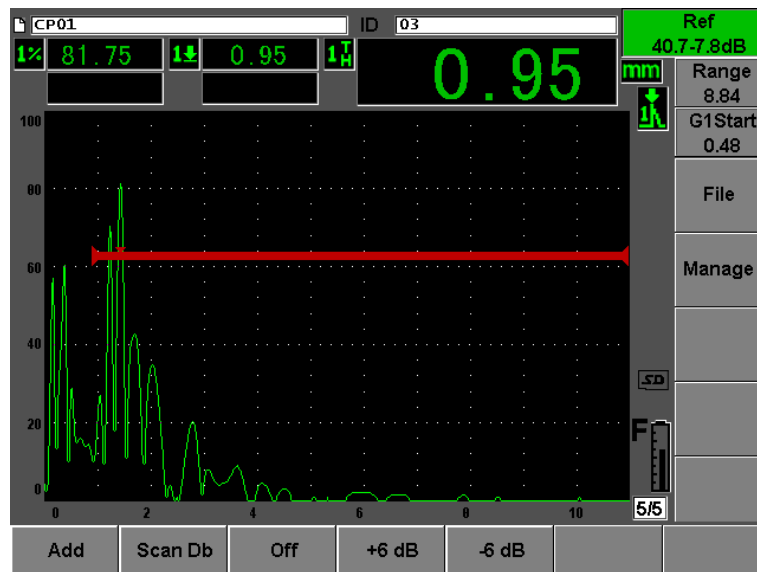


Figura 63 - Ensaio de US identificando o primeiro defeito.

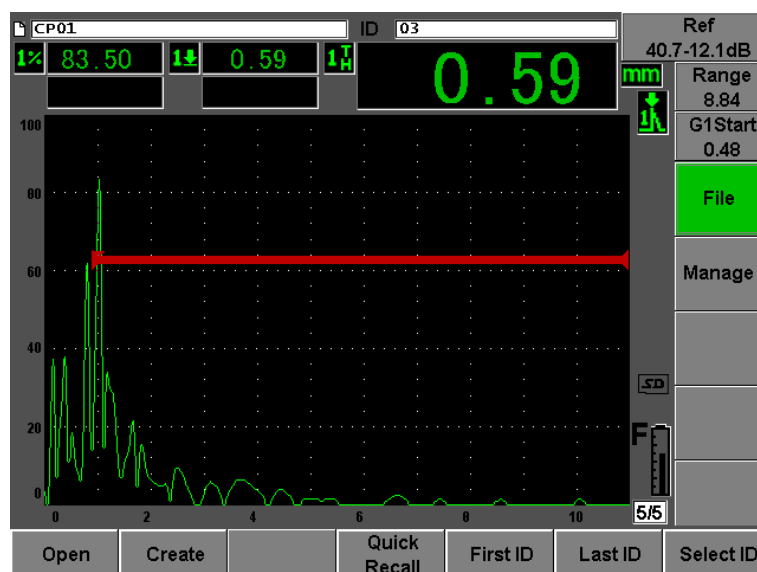


Figura 64 - Ensaio de US identificando o segundo defeito.

- CP 02

A segunda peça ensaiada possui um defeito inserido em seu centro de, aproximadamente, 0,9 mm em relação à sua superfície e, o ensaio de US realizado está mostrado na Figura 65.

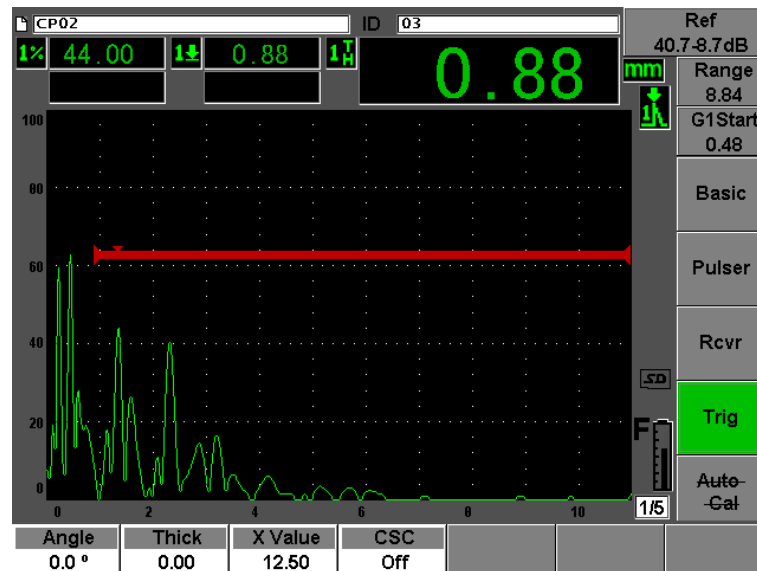


Figura 65 - Ensaio de US realizado no CP 02.

- CP 03

A terceira peça ensaiada possui um defeito inserido em seu centro de, aproximadamente, 0,75 mm em relação à sua superfície e, o ensaio de US realizado está mostrado na Figura 66.

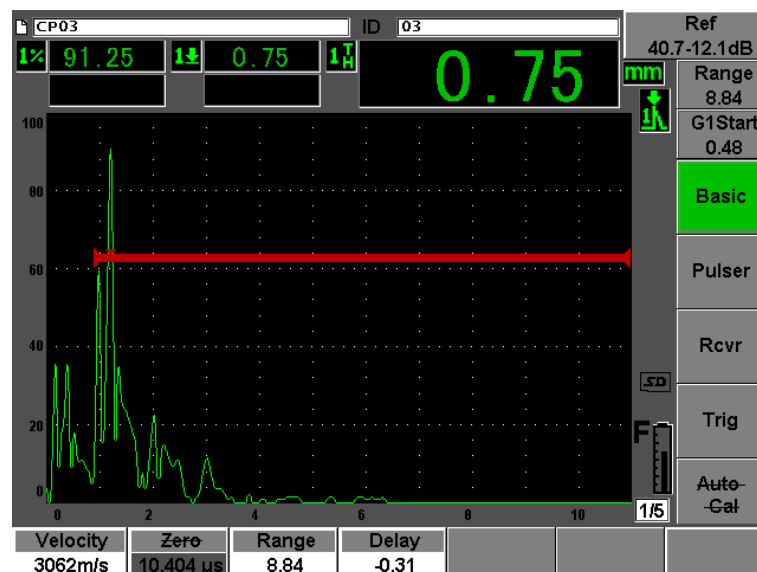


Figura 66 - Ensaio de US realizado no CP 03.

5. CONCLUSÃO

O projeto de Iniciação Científica realizado em 2015 tinha como finalidade a caracterização de danos através de ultrassonografia em laminados compósitos fibrosos aderidos com Surlyn. Devido aos problemas relatados no projeto, os objetivos da pesquisa tomaram outro rumo, partindo para a realização de um material didático visando a utilização de ensaios de ultrassom como END em materiais compósitos e poliméricos.

Perante essa primeira parte do trabalho, os ensaios por ultrassom não foram os mais adequados para caracterizar defeitos em compósitos laminados aderidos com Surlyn, pois os resultados dos testes mostram a dificuldade em identificar ecos de fundo e ecos referentes a defeitos inseridos no interior desses materiais, havendo grande dissipação de energia dos raios ultrassônicos nesse sistema. Dessa forma, não alcançamos o objetivo dessa parte do trabalho, que era realizar os ensaios de ultrassom antes e após o tratamento do material para verificar o potencial auto regenerativo do mesmo.

Perante esse fato, continuamos os trabalhos para caracterizar a técnica de ultrassom como END em GLARE-5, com a mesma finalidade que anteriormente proposta.

Diferentemente dos resultados nos compósitos anteriormente ensaiados, conseguimos, perante algumas adaptações, bons resultados em relação aos ensaios ultrassônicos, podendo concluir que a técnica de ultrassom é viável para esse tipo de material.

A análise dos resultados obtidos mostra que apenas a fibra de vidro foi danificada perante impacto balístico, com ambas as camadas de alumínio das superfícies apenas deformadas. Esse resultado possui extrema relevância para sua utilização em fuselagem de aeronaves, pois não pode haver ruptura completa desse material, adequado para tal utilização.

Os resultados poderiam ser melhores com materiais adequados de calibração e transdutores específicos para esse tipo de material.

Por fim, a organização desse material com intuito didático, para materiais compósitos e metálicos, mostrou o grande potencial e confiança dessa técnica, tornando-a de grande utilidade em indústrias de diversos setores, principalmente no auxílio e manutenção em componentes de aeronaves.

6. REFERÊNCIAS

1. Grimberg R., Savin A., Steigmann R., Bruma A. (2005). Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and kevlar, Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, Portoroz, Slovenia.
2. Goeje M.P., Wapenaar K.E.D. (1991) Non-destructive inspection of carbon fibre-reinforced plastics using eddy current methods, TNO Plastic and Rubber Research Institute, The Netherlands.
3. Lopes IAF (2009) Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
4. Summerscales J (1994) Manufacturing defects in fiber-reinforced plastics composites, Insight, Department of Mechanical and Marine Engineering, The University of Plymouth, UK.
5. NetComposites Ltd (Chesterfield, UK). Interactive Knowledge Base on NDE of Composites (2013).
6. Raj, Baldev (1947) Practical Non-destructive Testing, New Delhi, India Narosa Pub. House.
7. Audreucci, R. (2014) Ensaio por ultrassom: aplicação industrial. ABENDI.
8. Krautkramer “Ultrasonic Testing of Materials”.
9. Rose, J. L. (2004) Ultrasonic Waves in Solid Media, The Pennsylvania State University, US.
10. Silk, M. G. (1984) Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing, AERE Harwell, Bristol.
11. Evaluation of Ultrasonic Signals, Published on behalf of the International Institute of Welding, by the Welding Institute 1987.
12. Halmshaw, R. (1988) Introduction to the Non-Destructive Testing, Cambridge Welding Institute.
13. Paula Leite, Paulo Gomes de (1984) Ensaio não Destrutivos, São Paulo Associação Brasileira de Metais.